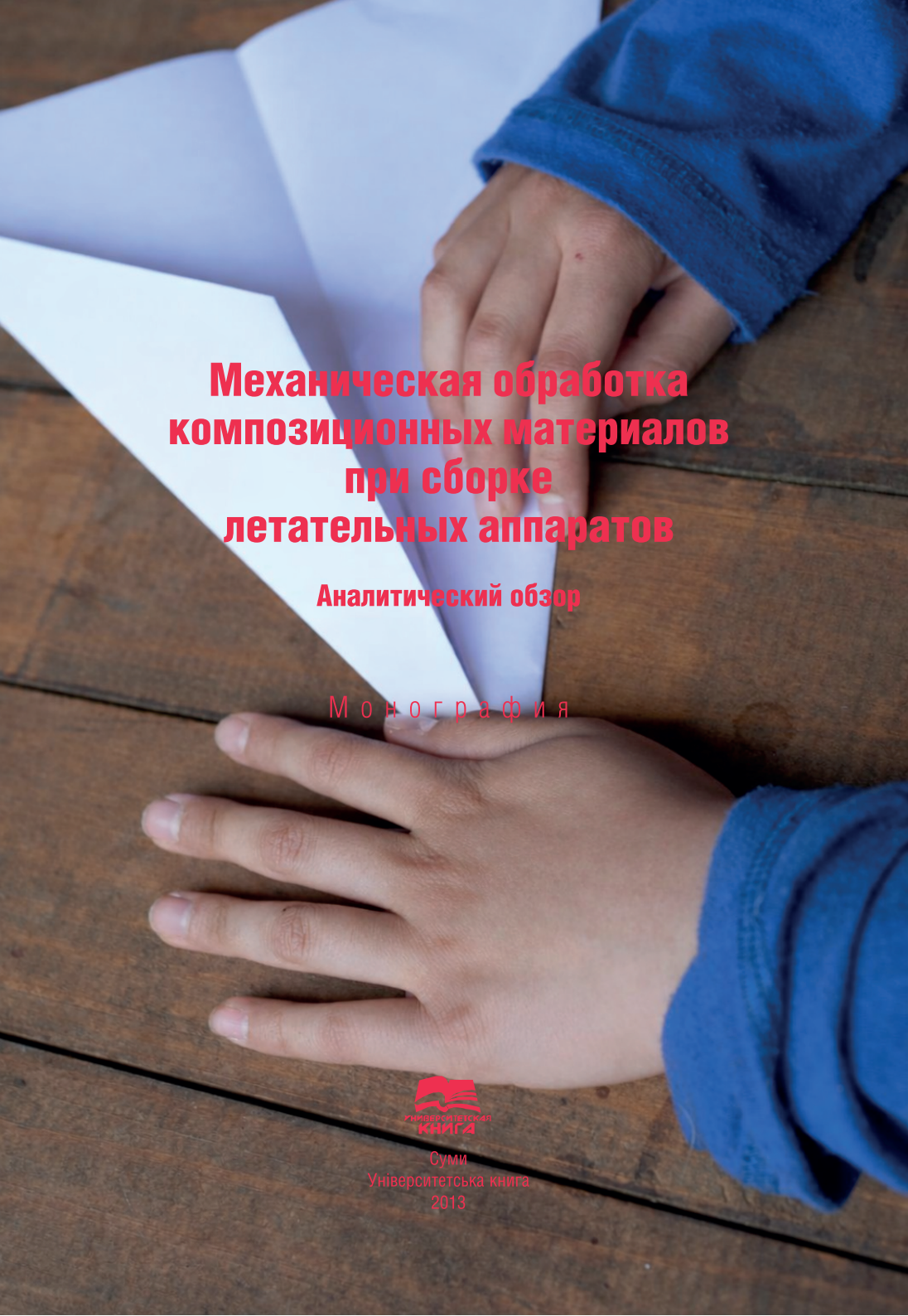


# Механическая обработка композиционных материалов при сборке летательных аппаратов

## Аналитический обзор

Монография

Суми
Університетська книга
2013

# Механическая обработка композиционных материалов при сборке летательных аппаратов

## Аналитический обзор

Монография

Суми
Університетська книга
2013

УДК 621.904:621.95:629.7
ББК 30.68+34.4
К 82

Рекомендовано к печати ученым советом Сумского государственного университета. Протокол № 3 от 21.11.2012 г.

Рецензенты:
*Тарасюк А.П.*, доктор технических наук, профессор, первый проректор по учебной работе Украинской инженерно-педагогической академии;
*Фадеев В.А.*, доктор технических наук, профессор, академик Инженерной академии Украины, главный инженер – первый заместитель директора Государственного предприятия «Харьковский машиностроительный завод «ФЭД»

*Авторы*:
Криворучко Дмитрий Владимирович, Залога Вильям Александрович, Пасечник Виталий Анатольевич, Колесник Виталий Александрович, Емельяненко Сергей Сергеевич, Некрасов Сергей Сергеевич

К 82 **Механическая** обработка композиционных материалов при сборке летательных аппаратов (аналитический обзор) : монография / Криворучко Д. В., Залога В. А., Колесник В. А. и др. ; под общей ред. проф. В. А. Залоги. – Сумы : Университетская книга, 2013. – 272 с.

ISBN 978-966-680-694-2

В монографии рассмотрены научные основы и методы механической обработки волокнистых полимерных композиционных материалов и пакетов волокнистых полимерных композиционных материалов с металлами. Описаны особенности обработки отверстий, инструментальное обеспечение, режимы резания, оборудование и технологические приемы. Основное внимание сосредоточено на сверлении отверстий и сопряженных с этим процессах стружкообразования, износа, образования дефектов и тепловых явлений. Приведен подробный анализ влияния различных факторов на расслаивание композиционных материалов. Предложены рациональные режимы резания композиционных материалов и пакетов с их применением, а также параметры режущего инструмента.

Для магистров, аспирантов, ученых, инженеров и работников машиностроительной и авиастроительной отрасли промышленности.

**УДК 621.904:621.95:629.7**
**ББК 30.68+34.4**

ISBN 978-966-680-694-2

© Криворучко Д.В., Залога В.А., Колесник В.А. и др., 2013
© ООО «ИТД «Университетская книга», 2013

# Содержание


Введение 9

**Раздел 1 Соединения в авиационных конструкциях 12**

1.1. Конструктивно-технологическая характеристика летательных аппаратов 12

1.2. Краткая характеристика материалов авиационных конструкций 17

1.2.1. Титановые сплавы 20

1.2.2. Алюминиевые сплавы 21

1.2.3. Сталь 21

1.2.4. Волокнистые полимерные композиционные материалы 21

1.2.5. Гальваническая совместимость материалов 27

1.3. Соединения в авиационных конструкциях 29

1.3.1. Классификация соединений 29

1.3.2. Механические соединения 32

1.3.2.1. Клепаные соединения 32

1.3.2.2. Шпилечно-болтовые соединения 34

1.3.2.3. Болт-заклепочные соединения 35

1.3.3. Несущая способность соединений 37

1.3.4. Масса элементов соединений 42

1.3.5. Трудоемкость выполнения соединений 43

1.3.6. Примеры выполнения соединений высоконагруженных узлов и деталей 45

1.4. Краткая характеристика рабочих процессов 49

1.4.1. Резание осевым инструментом 49

1.4.2. Спиральное фрезерование 50

1.4.3. Вырубка 52

1.4.4. Гидроабразивная резка 52

1.4.5. Лазерная резка 53

1.4.6. Электроэрозионная обработка 54

Выводы 55

**Раздел 2 Качество отверстий** **57**

2.1. Показатели качества отверстий в однородных пакетах ВПКМ 57
2.1.1. Повреждения отверстий 59
2.1.2. Точность отверстий 69
2.1.3. Микрорельеф поверхности 75
2.2. Качество отверстий в смешанных пакетах 80
2.3. Общие требования к качеству отверстий 89
Выводы 92

**Раздел 3 Основы резания волокнистых полимерных композиционных материалов** **95**

3.1. Механика прямоугольного резания 95
3.1.1. Стружкообразование 95
3.1.2. Влияние различных факторов на процесс стружкообразования 99
3.1.3. Влияние различных факторов на силу резания 106
3.1.4. Тепловые процессы 112
3.2. Общие представления об износе инструментов 113
3.2.1. Виды износа 113
3.2.2. Механизмы изнашивания 114
3.2.3. Критерии износа и стойкость инструмента при резании ВПКМ 117
Выводы 119

**Раздел 4 Технологические особенности обработки отверстий при сборке авиационных конструкций** **121**

4.1. Общая характеристика технологических процессов выполнения болтовых и заклепочных соединений 121
4.2. Технологические особенности обработки отверстий под болты и заклепки 126
4.2.1. Формирование отверстий 130
4.2.1.1. Ручное сверление 135
4.2.1.2. Сверление с механической подачей 137
4.2.2. Изготовление гнезд под потайную головку 137
4.2.3. Окончательная обработка отверстий 141
4.2.3.1. Зенкерование 141
4.2.3.2. Развертывание 141
4.2.3.3. Протягивание 145

4.2.5. Обработка высокоточных отверстий 146
4.2.5. Упрочнение отверстий 147
Выводы 149

**Раздел 5 Особенности сверления отверстий в пакетах, содержащих ВПКМ 150**

5.1. Механика стружкообразования 150
5.2. Осевая сила и крутящий момент 152
5.3. Тепловые процессы 158
5.4. Износ и стойкость сверл 160
5.5. Влияние различных факторов на расслаивание обрабатываемого материала 165
5.5.1. Влияние режима резания 166
5.1.2. Влияние износа сверла 167
5.5.3. Влияние геометрических параметров и конструкции инструмента 169
5.5.4. Влияние материала матрицы и формы армирования 172
Выводы 173

**Раздел 6 Инструментальное обеспечение рабочих процессов обработки отверстий в волокнистых полимерных композиционных материалах 176**

6.1. Особенности применения современных инструментальных материалов 176
6.1.1. Твердые сплавы 179
6.1.2. Поликристаллический алмаз 181
6.1.3. Эффект от применения покрытий 182
6.2. Обрабатываемость аэрокосмических материалов 187
6.3. Инструменты для обработки отверстий 189
6.3.1. Сверла 189
6.3.1.1. Конструкции цельных сверл 189
6.3.1.2. Конструкции сборных сверл 192
6.3.1.3. Формы вершины (режущей части) спиральных сверл 198
6.3.1.4. Влияние параметров сверла на показатели процесса сверления 205
6.3.1.5. Режимы резания и сравнение эффективности различных сверл 210

6.3.2. Инструменты для чистовой обработки отверстий 212
6.3.3. Инструмент для снятия заусенцев и обработки фасок 215
6.3.4. Комбинированный осевой инструмент 218
Выводы 223

**Раздел 7 Технологические методы обеспечения качества отверстия 225**
7.1. Применение опорной пластины 226
7.2. Применение направляющего отверстия 226
7.3. Применение термического воздействия на инструмент 228
7.4. Нетрадиционные кинематические схемы резания 229
7.4.1. Сверление с вибрациями 229
7.4.2. Прерывистое сверление 230
7.4.3. Сверление с адаптивным управлением подачей 231
7.4.4. Спиральное фрезерование 232
7.5. Сравнительная оценка технологических процессов в условиях стапельного сборочного производства летательных устройств 234
Выводы 240

**Раздел 8 Оборудование для обработки отверстий 242**
8.1. Портативные ручные машины 244
8.2. Стационарные машины и агрегаты 247
8.3. Машины для обработки отверстий методом спирального фрезерования 253
8.4. Приспособления агрегатно-сборочного производства 255
Выводы 259

Заключение 261
Список литературы 262

# Введение

Использование современных CAD/CAM-систем для проектирования, подготовки производства, а также применение эффективного автоматизированного оборудования при изготовлении высоконагруженных конструкций из волокнистых полимерных композиционных материалов (ВПКМ) позволяют минимизировать объем или полностью исключить механическую обработку отформованных композитных деталей.

Несмотря на достигнутый высокий уровень интегрированности авиационных конструкций из ВПКМ, узлы, отсеки и агрегаты планера самолета являются преимущественно сборными. Сборка таких конструкций выполняется с использованием различных видов крепежных элементов – как традиционных, так и специальных (болтов, заклепок и др.).

В связи со значительными габаритами сборных элементов конструкций из ВПКМ современных, прежде всего, пассажирских самолетов количество крепежных элементов, устанавливаемых в процессе их сборки, составляет десятки тысяч штук. Такое же количество отверстий с требуемыми геометрическими, точностными и качественными показателями должно быть выполнено в собираемых конструкциях. Эти конструкции, кроме деталей из ВПКМ, могут включать элементы, изготовленные из титановых, алюминиевых и других сплавов.

Специфические особенности агрегатно-сборочного производства авиационных конструкций, в том числе из ВПКМ, исключают возможность использования для обработки отверстий под крепежные элементы стационарного механообрабатывающего оборудования, смазочно-охлаждающих жидкостей, ряда других технологических методов и средств, традиционных для механообрабатывающего производства.

Этими обстоятельствами обусловлена возрастающая актуальность разработки эффективных методов и средств механической обработки ВПКМ, в частности выполнения точных отверстий под крепежные элементы.

Представленные ниже материалы подготовлены по результатам выполненного авторами аналитического обзора открытых отечественных и зарубежных публикаций, посвященных данной проблеме. Целью исследования являлось определение общих тенденций развития

технологии механической обработки ВПКМ в условиях сборочного производства авиационных конструкций, а также выявление отдельных эффективных технических решений, которые могут быть адаптированы в технологическую среду отечественного самолетостроения.

Монография состоит из восьми разделов. В первом разделе рассмотрены основные термины, связанные с композиционными материалами вообще и с технологией их механической обработки в частности.

Во втором разделе приведена информация о критериях качества обработанных поверхностей ВПКМ, в том числе и качества отверстий. Слоистая структура ВПКМ делает невозможным применение традиционных для металлических материалов показателей качества. Поэтому в данном разделе авторы большое внимание уделили специфическим для ВПКМ показателям качества, методам их оценки.

В третьем разделе изложены основы теории резания ВПКМ лезвийным инструментом. На основе данных о прямоугольном свободном резании исследовано влияние структуры ВПКМ, геометрии режущего инструмента и факторов на стружкообразование, силу и температуру резания, износ инструмента.

В четвертом разделе рассмотрены технологические особенности обработки отверстий при сборке авиационных конструкций. Дана общая характеристика технологических процессов выполнения болтовых и заклепочных соединений, описаны способы достижения высокой точности и качества отверстий.

Пятый раздел посвящен особенностям обработки отверстий в разнородных пакетах, содержащих ВПКМ. Рассмотрено влияние различных факторов на силу и температуру резания, стойкость инструмента и качество обрабатываемого отверстия.

В шестом разделе выполнен анализ современного инструментального обеспечения рабочих процессов обработки отверстий в ВПКМ. Кратко охарактеризованы особенности применения современных инструментальных материалов для обработки ВПКМ, конструкции осевых режущих инструментов для формирования отверстий в ВПКМ и методы их применения.

В седьмом разделе дана сравнительная оценка современных технологических методов обеспечения качества отверстия в ВПКМ. Рассмотрены как традиционные методы, например, метод опорной пластины, так и новые, совсем недавно появившиеся, например, метод спирального сверления.

В восьмом разделе содержится краткий обзор оборудования для обработки отверстий, включая портативные и стационарные машины, машины для обработки отверстий методом спирального фрезерования и приспособления агрегатно-сборочного производства.

Надеемся, что монография будет полезна магистрам, аспирантам и инженерно-техническим работникам машиностроительной и авиастроительной отраслей промышленности и внесет вклад в развитие технологий обработки волокнистых полимерных композиционных материалов.

Авторы благодарят за помощь, предоставленную информацию и оказанные консультации ПАО «Украинский научно-исследовательский институт авиационной технологии» и лично директора института, доктора технических наук, профессора, заслуженного деятеля науки и техники Украины Г. А. Кривова, а также руководителя центра инжиниринга, технологий и систем производства института, кандидата технических наук, заслуженного работника промышленности Украины В. А. Матвиенко.

Глубокую признательность выражаем компании ISCAR и ее официальному представителю на территории Украины компании ООО «Искар Украина» за информационную и финансовую поддержку издания книги.

РАЗДЕЛ 1

# Соединения в авиационных конструкциях

## 1.1. Конструктивно-технологическая характеристика летательных аппаратов

Повышение эффективности процессов проектирования и изготовление современных конструкций планера летательных аппаратов (ЛА) тесно связаны. Несмотря на повышение стоимости, вызванное увеличением объемов использования более дорогих компонентов и узлов, для максимального снижения массы ЛА применяются дорогостоящие волокнистые полимерные композиционные материалы (ВПКМ), титановые и алюминиевые сплавы (рис. 1.1). Наибольшая часть затрат при производстве самолетов (более 45%) связана с проектированием, изготовлением и сборкой планера ЛА, в то время как стоимость двигателей, например, для реактивных самолетов составляет не более 20–25% общей стоимости [1].

Известно, что конструкция планера ЛА и технология его изготовления находятся в неразрывной взаимосвязи. При этом вначале изменяется конструкция ЛА, а затем технология его изготовления. Борьба

**Рис. 1.1**. Баланс затрат при создании самолета [1]

за уменьшение массы планера, а также увеличение его ресурса и надежности привела [2]:

- к переходу в широкофюзеляжных самолетах на неразъемные конструкции крыла и фюзеляжа, т.е. к отказу от конструктивных разъемов по всем основным частям планера;
- к использованию для изготовления панелей толстолистовых обшивок размером до 25х2 м, т.е. к увеличению геометрических размеров панелей, балок, лонжеронов, шпангоутов, выполняемых из монолитных заготовок;
- к применению ВПКМ и использованию сварных панелей с сотовыми заполнителями из титановых и других металлических сплавов;
- к использованию комбинированных монолитно-сборных панелей, состоящих из толстолистовых заготовок, подкрепленных мощным стрингерным набором, или панелей из склеенных тонколистовых заготовок.

Узлы и панели ЛА можно объединить в группы по конструктивно-технологическим признакам. Такое объединение позволяет разрабатывать технологические процессы и оснастку не на отдельные узлы, а на группы узлов, сходные по конструктивно-технологическим признакам, а также использовать типовые технологические процессы и унифицированную оснастку [3].

Выбор способов базирования отдельных узлов и деталей при сборке ЛА обусловлен высокими требованиями к их точности и взаимозаменяемости, определяемыми принадлежностью узла к соответствующим функциональным контурам. Поэтому при проектировании и изготовлении рассматривают как узлы, выходящие на аэродинамический обвод, так и имеющие стыки и разъемы с другими элементами конструкции, не связанными с ним.

Последовательность выполнения сборочных операций зависит от конструкции, габаритных размеров и жесткости собираемых деталей и узлов, а также от схемы их базирования при сборке ЛА [3].

Последовательность сборки и конструкцию сборочной оснастки определяют геометрические свойства узлов. Выделяют такие узлы: условно плоские и плоские, криволинейные в пространстве с одинарной или линейчатой кривизной, криволинейные в пространстве с двойной кривизной или круткой [3].

Состав сборочных операций и последовательность их выполнения в значительной степени зависят также от способа герметизации

стыковых соединений. В последнее время разработаны эффективные способы герметизации различных типов стыков и различных элементов конструкции. Так, например, применяются поверхностная герметизация с использованием облегченного жгутика, прерывистая внутришовная герметизация, поверхностная герметизация с наложением дополнительного жгутика и др. [3].

В общем случае типовой технологический процесс сборки любого элемента конструкции ЛА состоит из таких операций [2, 3]:

1) подготовка деталей и сборочных узлов к сборке;
2) предварительная установка, закрепление и раскрепление деталей;
3) разборка деталей и сборочных узлов;
4) доводка деталей и сборочных узлов;
5) окончательная установка и закрепление деталей и сборочных узлов;
6) окончательное соединение деталей и сборочных узлов;
7) проверка собранного изделия в соответствии с чертежами, техническими условиями (ТУ) и техническими требованиями (ТТ).

Особое значение при сборке конструкций ЛА имеет объемная увязка деталей и узлов, обеспечивающих получение аэродинамических обводов заданной точности [2]. Современный уровень проектирования любого изделия предусматривает создание его трехмерной компьютерной модели. При этом параллельно создается модель технологической оснастки, обеспечивающей правильную взаимную ориентацию деталей при сборке. Повышение производительности сборочных работ обеспечивается механизацией и автоматизацией проведения основных типовых технологических операций: разметки, кроя, сверления и клепки.

Время сборки в цикле изготовления ЛА в среднем составляет 50–75%, а ее трудоемкость 30–40% трудоемкости изготовления всего ЛА [2, 3, 4].

Основным способом соединения силовых узлов конструкции планера ЛА (лонжеронов, нервюр и шпангоутов), которые относятся к плоскокаркасным узлам (ПКУ), является использование заклепочных соединений. На долю сверлильно-клепальных работ (СКР) приходится не менее 30–45% трудоемкости сборочных работ (по некоторым данным, например [3], 40–60%). В среднем при изготовлении заклепочного соединения трудоемкость сверления составляет 30%, зенкерования – 13%, установка заклепок – 4%, расклепывание заклепок – 53%.

На рис. 1.2 показана последовательность выполнения трех основных типовых операций сборки крыла [4]: установка и фиксация лон-

жеронов и ребер (а), установка и закрепление обшивки с помощью заклепок (б), присоединение передних кромок и законцовок крыла, рулей и других его элементов (в). Сложность конструкции, многообразие вариантов доступа к зоне клепки, большая номенклатура заклепок по размерам, малая протяженность швов и другие факторы ограничивают применение станков с ЧПУ и автоматов для выполнения операций механической обработки и клепки при сборке ЛА. Это обусловливает широкое и преимущественное использование ручных сверлильных машин и клепальных молотков, что не позволяет достигнуть высокой производительности труда, не гарантирует стабильности требуемого качества соединений и, как правило, вредно воздействует на организм человека.

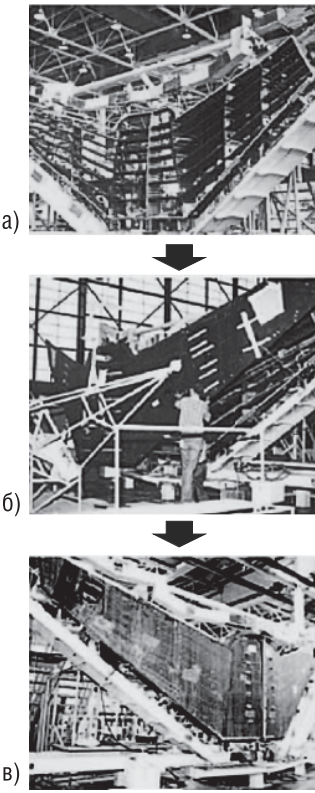



**Рис. 1.2.** Типовые операции сборки ЛА [4]

Уровень механизации и автоматизации технологических процессов изготовления ПКУ определяется используемым методом сборки. Распространены два метода сборки ПКУ – по сборочным отверстиям (СО) и в сборочном приспособлении (СП). Сущность первого метода заключается в том, что базирование деталей относительно друг друга осуществляется совмещением специально предусмотренных технологических отверстий. Эти отверстия выполняются с помощью 3D компьютерных моделей еще на этапе изготовления деталей. Сущность второго метода – базирование деталей относительно базовых поверхностей по элементам фиксации СП [3].

В последние годы для совмещения деталей и отверстий при сборке ПКУ все чаще используется метод сборки с помощью лазерного проецирования (рис. 1.3).

Сравнительно частая сменяемость объектов сборки, малая жесткость деталей и узлов, необходимость постоянного увеличения точности выполнения наружных обводов и мест сопряжений конструкций ЛА приводят к введению на многих деталях и узлах определенных

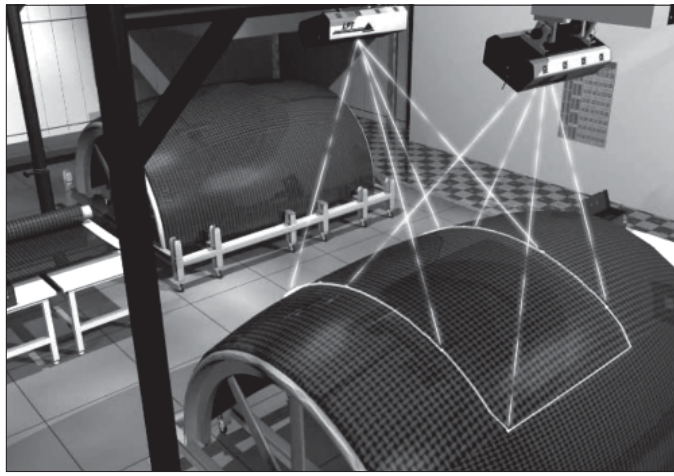


**Рис. 1.3.** Сборка с применением лазерного проектирования[1].

припусков, которые удаляются при сборке механической обработкой в процессе подгонки, не исключающей использования любого метода сборки авиационных конструкций. Подгонка может осуществляться как ручным, так и механизированным способами путем обрезки припусков на листовых деталях, опиливания кромок и плоскостей деталей, шабрения сопрягаемых плоскостей, фрезерования поверхностей, сверления и развертывания отверстий, подгибки листовых деталей по контуру, деформирования и других операций. Каждому методу сборки присущи свои способы выполнения подгоночных работ.

Подгонка деталей по месту иногда является технически необходимой, особенно если она является единственным способом достижения высококачественного сопряжения в многозвенной размерной цепи.

[1] По материалам сайта : http://www.lptcorp.com

## 1.2. Краткая характеристика материалов авиационных конструкций

В современных самолетах широко применяются как металлические материалы (титановые и алюминиевые сплавы, стали и др.), так и ВПКМ. Металлические материалы составляют около 80% массы реактивных двигателей из-за жестких условий эксплуатации и необходимости высокой технологичности деталей для их размещения в ограниченном пространстве.

Использование ВПКМ в узлах самолета постоянно растет, хотя и не так стремительно, как предсказывалось ранее, несмотря на необходимость существенного сокращения веса конструкций и другие преимущества, которые могут обеспечить эти материалы [5, 6, 7]. Следует отметить, что масса металлических материалов по-прежнему составляет не менее двух третей от веса планера с явно выраженной тенденцией уменьшения доли алюминиевых сплавов за счет их замены титановыми (рис. 1.4). В последние годы успеха достигла компания «Боинг», доведя использование ВПКМ в планерах самолетов серии 787 до 50% (см. рис. 1.5, 1.6).

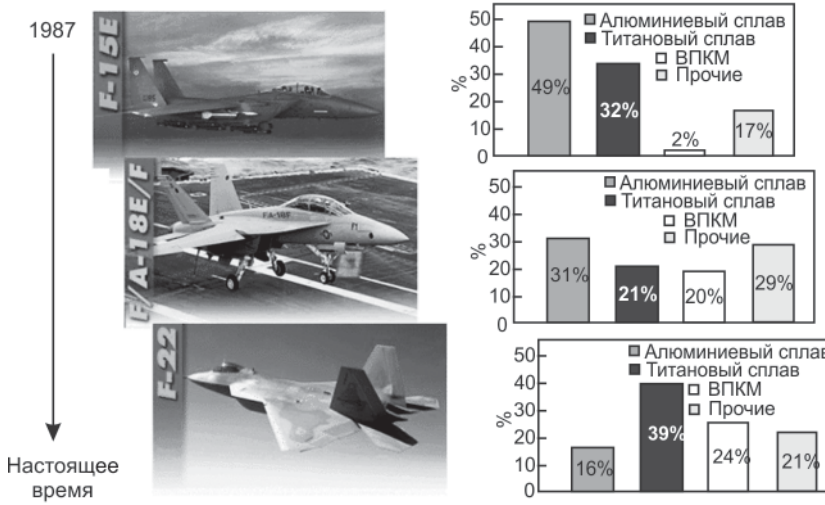



**Рис. 1.4.** Применение материалов в конструкциях военных самолетов [1]

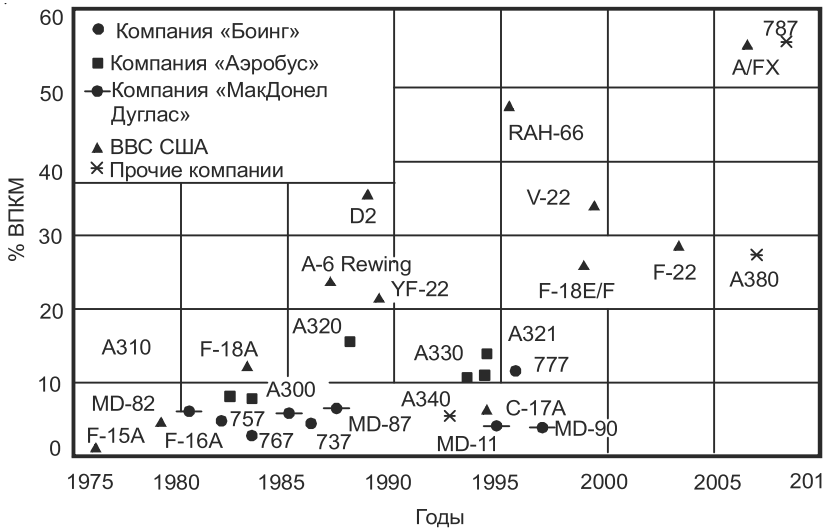



**Рис. 1.5.** Тенденции увеличения доли ВПКМ в конструкциях планеров ЛА [8]

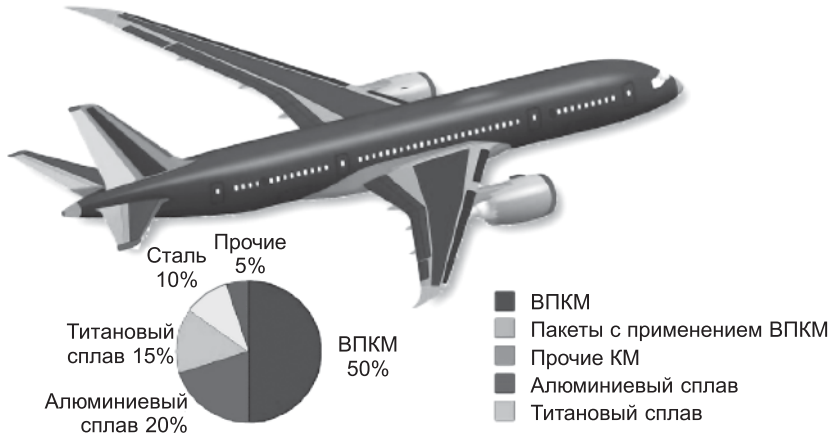



**Рис. 1.6.** Применение материалов в конструкции самолета Boeing 787 [9]

**Таблица 1.1.** Применение различных материалов в конструкциях истребителей [1]

| Материал | (RAND Research and Development) / Исследования и разработка | | | | (USAF/AFRL)ВВС США / Исследовательская лаборатория ВВС США | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | F-111 (1967) | F-15 (1972) | F-16 (1976) | F-18 (1978) | C-17 | AV-8B | B-2 | F-18 | F-22 |
| Алюминиевые сплавы, % | 59 | 52 | 79 | 48 | 70 | 47 | 27 | 27 | 16 |
| Титановые сплавы, % | 5 | 40 | 2 | 14 | 9 | - | 23 | 23 | 39 |
| Сталь, % | 33 | 5 | 4 | 15 | – | – | – | – | – |
| ВПКМ, % | 1 | 2 | 5 | 11 | 8 | 26 | 37 | 22 | 25 |
| Другие, % | 2 | 1 | 10 | 12 | 13 | 27 | 13 | 13 | 20 |

Существуют четыре основных причины того, почему ВПКМ не смогли полностью вытеснить металлы из конструкций ЛА [6]:

1) некоторые материалы (титановые и алюминиевые сплавы и сталь) обладают механическими и тепловыми свойствами, которые имеют решающее значение в ряде конструкций и не могут быть сегодня заменены ВПКМ;
2) ВПКМ все еще развиваются: создаются новые армирующие волокнистые наполнители (ВН) и матрицы, свойства которых не так хорошо изучены, как свойства металлов. Поэтому, учитывая высокую стоимость сертификации новых узлов, как правило, применяется консервативный подход к внедрению новых ВПКМ, по крайней мере, до тех пор, пока их свойства не будут полностью изучены;
3) изготовление из ВПКМ некоторых геометрически сложных деталей пока еще не является экономически выгодным;
4) в общем случае удельная стоимость ВПКМ в настоящее время больше, чем металлов, особенно алюминия и его сплавов.

Именно поэтому, несмотря на увеличение доли используемых ВПКМ, на практике изготовление корпусов и двигателей будет и далее сопряжено с использованием различных (металлических и неметаллических) материалов (табл. 1.1). Это означает, что узлы и элементы авиационных конструкций будут включать как ВПКМ, так и металлические сплавы различных типов и марок, баланс в выборе которых в значительной степени будет зависеть от конструкторских и экономических факторов.

### 1.2.1. Титановые сплавы

Титан и титановые сплавы по сравнению с алюминиевыми обладают более высокой тепло- и коррозионной стойкостью, а также большей удельной прочностью. Основными причинами, позволяющими увеличивать в авиационных конструкциях долю использования титана и титановых сплавов, являются:

1) *снижение веса при сохранении требуемых прочностных показателей*. В различных изделиях из титановых сплавов отношение прочности к весу, как правило, превышает подобный показатель для более прочных, но при этом и более тяжелых легированных сталей, и легких, но более хрупких алюминиевых сплавов. Сталь и никелевые сплавы имеют плотность приблизительно в 1,7 раза больше, чем плотность титана;
2) *рабочая температура*. Титан и титановые сплавы обычно используются, когда рабочая температура превышает допустимую рабочую температуру алюминия, равную 135 °С. Подобные условия существуют в гондоле, во вспомогательной силовой установке и в системах противообледенительной защиты крыла, а также в других элементах конструкции ЛА;
3) *пространственное ограничение*. Титан может заменить более легкие алюминиевые сплавы там, где пространство ограничено, например, шасси;
4) *высокая коррозионная стойкость*. Высокая коррозионная стойкость титановых сплавов позволяет использовать их в большинстве изделий, без создания специальных защитных покрытий;
5) *совместимость с ВПКМ*. Титан применяется в пакетах с ВПКМ, потому что химически титан лучше, чем алюминий, сочетается с углеродным ВН и имеет как более высокий коэффициент теплового расширения, так и больший модуль упругости, что приближает его по свойствам к ВПКМ.

В авиационных конструкциях обычно используют титановые сплавы, легированные алюминием, ванадием и другими металлами. Наиболее применяемым сплавом в конструкции планера ЛА является титановый сплав ВТ6 (Ti-6A1-4V).

### 1.2.2. Алюминиевые сплавы

Алюминиевые сплавы обычно применяются в конструкциях планеров ЛА там, где требования к прочности являются относительно умеренными. Исторически сложилось так, что алюминий и алюминиевые сплавы нашли широкое применение в конструкциях планеров вследствие их сравнительно небольшого веса, низкой стоимости сырья, хороших тепловых свойств, большого опыта производства и обширной базы данных, которая обеспечивает высокую надежность проектных решений. Именно поэтому алюминиевые сплавы являются более легким и дешевым решением по сравнению с использованием в конструкциях ЛА титановых сплавов совместно с ВПКМ. Но следует отметить, что при совместном использовании алюминиевых сплавов и ВПКМ необходимо учитывать следующие особенности: 1) разность потенциалов алюминиевых сплавов и ВПКМ; 2) более высокий коэффициент теплового расширения алюминиевых сплавов и низкий модуль упругости по сравнению с ВПКМ. Это в совокупности усложняет соединение ВПКМ и алюминиевых сплавов, хотя и не исключает этого. Так, углеродный ВН может использоваться с матрицей из алюминия или магния при условии, что выдержка такого соединения при высокой температуре сведена к минимуму [5].

### 1.2.3. Сталь

В настоящее время применение стали в конструкциях ЛА, а особенно в конструкциях военных самолетов, ограничено. Начиная с истребителя С-17 (с 1980-х годов), в конструкциях истребителей эта группа материалов практически не применяется (табл. 1.1). Как правило, сегодня сталь применяют только там, где необходима высокая прочность, например, для заклепок, посадочных зубчатых колес, шпинделя горизонтальных стабилизаторов и т.п. В наибольшей степени ограничивает применение стали ее высокая плотность (в 1,7 раза большая, чем у титана).

### 1.2.4. Волокнистые полимерные композиционные материалы

В последние годы в авиации все шире внедряются ВПКМ. Следует отметить, что на ранних этапах развития ВПКМ в матрицах с эпоксидной смолой использовался стекловолокнистый наполнитель. Этот

ВПКМ применялся для обтекателей антенны радиолокатора и вертолетных лопастей, но из-за низкой жесткости он оказался непригодным для использования в конструкции крыла самолета. В 1960 годах был изобретен новый наполнитель, названый кевларом. ВПКМ с кевларом превосходит по жесткости ВПКМ со стекловолоконным наполнителем. Вместе с тем эти ВПКМ в большинстве своем использовались, как правило, во второстепенных узлах, поскольку оставались недостаточно прочными и трудными в обработке. Широкое применение ВПКМ в конструкциях планера ЛА сдерживало и свойство эпоксидных смол, входящих в состав этих материалов, впитывать влагу, которая ослабляет связи «волокнистый наполнитель – матрица» и снижает прочность ВПКМ.

Первыми ВПКМ, оказавшимися достаточно прочными для использования в основных узлах ЛА, были стеклопластики, которые позже были заменены более дешевыми углепластиками (УП) (рис. 1.7). Углеволоконный наполнитель имеет свойства, подобные стекловолоконному наполнителю. Модуль упругости УП в 3 раза превышает модуль упругости стеклопластиков и в 1,5 раза кевлара или композиции кевлар/алюминий.

Применение УП в аэрокосмической отрасли сопряжено с рядом сложностей. УП является хрупким материалом, который в области концентрации напряжений не поддается пластической деформации. Кроме того, этот материал плохо воспринимает ударную нагрузку.

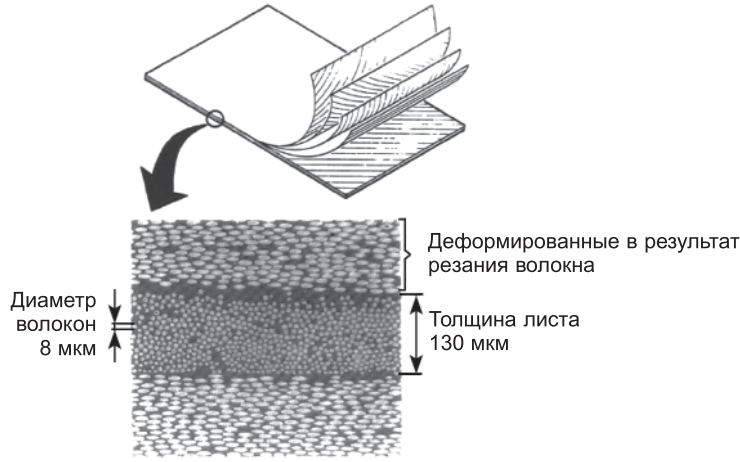



**Рис. 1.7.** Микроструктура ВПКМ в сечении [4]

С другой стороны, УП является жестким материалом, что делает его по сравнению с металлами более устойчивым к усталостному разрушению. Подсчитано, что замена 40% конструкции из алюминиевого сплава на УП приведет к 12% снижению веса всей конструкции [118].

Одним из резервов повышения прочности ВПКМ является создание слоистых ВПКМ. Слоистые ВПКМ изготавливаются путем соединения двух или более листов ВПКМ. Каждую пластину изготавливают с параллельным расположением ВН, вплетенного в полимерную матрицу. При изготовлении слоистого ВПКМ листы ПКМ соединяют таким образом, чтобы волокнистый наполнитель в них был расположен в разных направлениях. На рис. 1.8 изображен слоистый ВПКМ, состоящий из четырех листов ПКМ.

Существует возможность создания материалов из разных типов ВН, в частности:

- с углеродным ВН с углом направленности 0°;
- со стекловолоконным ВН или кевларом с углом направленности 90°.

Чтобы избежать гофрирования (волнистости), используют прием, при котором ВН соединяются в месте плетения. Материалы, содержащие ВН, направленные под углом 0°, 90° и ±45° в любых соотношениях, называют ***негофрированными***. Вследствие устранения волнистости слоистые негофрированные ВПКМ обладают большей прочностью на сжатие по сравнению с гофрированными. Жесткость слоистых негофрированных ВПКМ на 10% больше как при сжатии, так и при растяжении [5].

В последних моделях самолетов УП широко применяется в крыльях, хвостовых стабилизаторах и передней части фюзеляжа. Вследствие повышенной способности сопротивляться усталостному разрушению применение УП для изготовления вертолетных лопастей позволило существенно увеличить срок их службы.

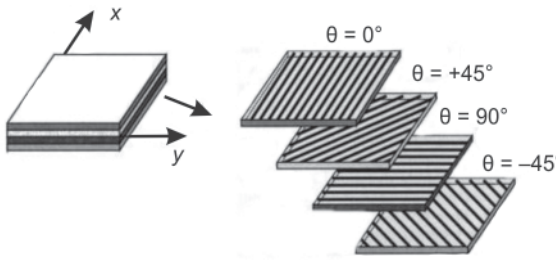



**Рис. 1.8.** Принципиальная схема слоистых ВПКМ [10]

Удельные прочность (предел прочности/плотность) и жесткость (модуль упругости/плотность) высокопрочного ВН, особенно из углерода, выше, чем у прочих аэрокосмических материалов, в том числе и металлов (рис. 1.9, табл. 1.2). Это обусловливает наивысшую структурную эффективность углепластиков по сравнению с титановыми и алюминиевыми сплавами (см. рис. 1.10).

Прочность ВПКМ зависит от многих факторов. Из-за высокой анизотропии свойств одним из них является направление приложения силы относительно ВН (см. табл. 1.2, рис. 1.11). Поэтому применение ВПКМ при трехмерном нагружении ограничивается низкой прочностью листа из ВПКМ при нормальных нагрузках [5].

Существенное влияние на механические свойства ВПКМ оказывает температура. Как правило, с увеличением температуры снижаются механические свойства матрицы. Низкие температуры также

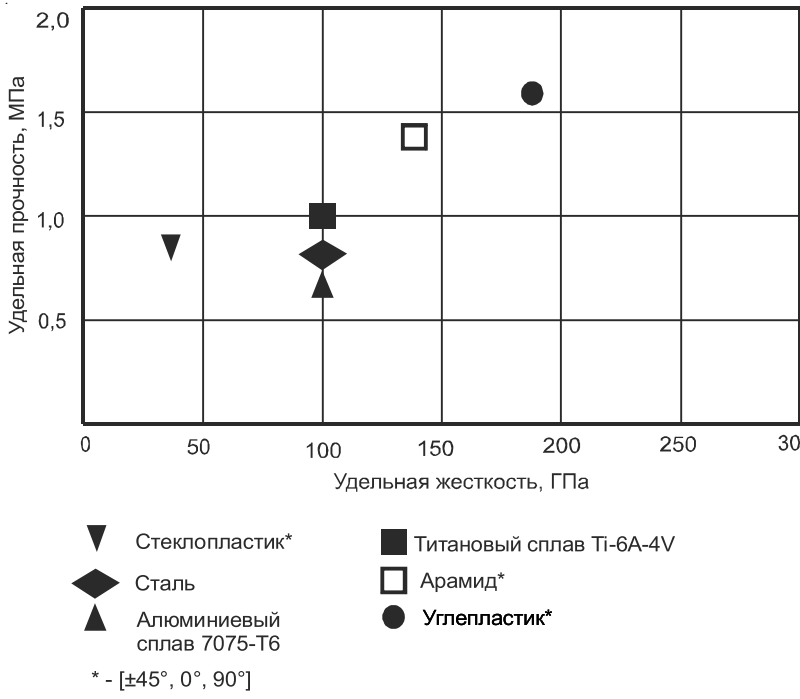



**Рис. 1.9.** Удельная прочность и жесткость различных конструкционных материалов [11]

**Таблица 1.2.** Сравнение свойств ВПКМ с металлическими конструкционными материалами [6]

| Свойства | Единица измерения | Алюминий 7050-T7451 | Титановый сплав ВТ6 | Сталь PH13-8Mo | Стекло-пластик | Кевлар | Углепластик | Углепластик IM7/977-3 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Плотность | кг/м$^3$ | 2820 | 4430 | 7760 | 2080 | 1350 | 1530 | 1580 |
| Предел прочности при растяжении вдоль ВН | МПа | 485 | 925 | 1385 | 1250 | 280 | 1130 | 2290 |
| Предел прочности при сжатии вдоль ВН | МПа | – | – | – | 600 | 280 | 1130 | – |
| Предел прочности при растяжении перпендикулярно направлению ВН | МПа | – | – | – | 35 | 28 | 42 | – |
| Предел прочности при сжатии перпендикулярно направлению ВН | МПа | – | – | – | 141 | 141 | 141 | – |
| Предел прочности при сдвиге в плоскости | МПа | — | – | – | 63 | 45 | 63 | – |
| Предел прочности при межслоевом сдвиге | МПа | – | – | – | 80 | 60 | 90 | – |
| Модуль упругости вдоль ВН | ГПа | 72 | 115 | 205 | 45 | 85 | 134 | – |
| Модуль упругости перпендикулярно направлению ВН | ГПа | – | – | – | 12 | 5,6 | 7 | – |
| Модуль сдвига | ГПа | 27 | 43,5 | 80 | 4,5 | 2,1 | 4,2 | – |
| Коэффициент Пуассона | | 0,33 | 0,32 | 0,28 | 0,3 | 0,34 | 0,25 | – |
| Коэффициент температурного расширения вдоль ВН | $\frac{\text{мкм}}{\text{м}\times\text{К}}$ | 23 | 8,4 | 13 | –(4–7) | –4 | 1,2 | – |
| Коэффициент температурного расширения перпендикулярно направлению ВН | $\frac{\text{мкм}}{\text{м}\times\text{К}}$ | – | – | – | 16–20 | 58 | 34 | – |
| Удельная прочность | кН·м/кг | 172 | 209 | 178 | 601 | 207 | 739 | 1449 |
| Удельная жесткость | МН·м/кг | 25,5 | 26,0 | 26,4 | 22 | 63 | 88 | 95 |
| Максимальная рабочая температура | С° | 120 | 230 | 540 | 180 | 150 | – | 135 |

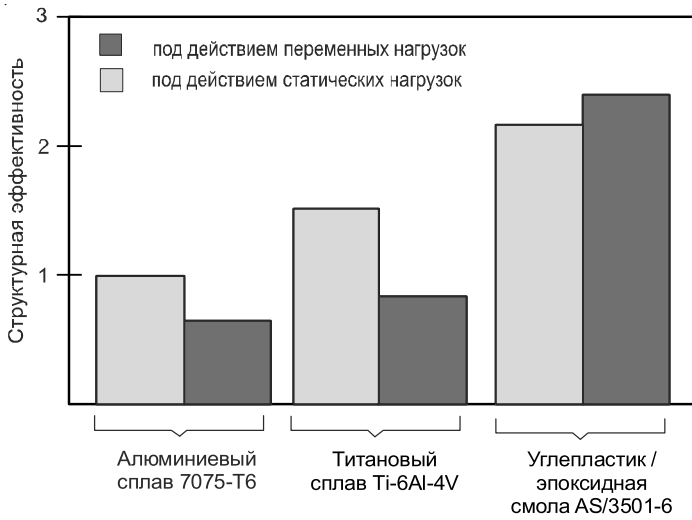



**Рис. 1.10.** Структурная эффективность авиационных материалов

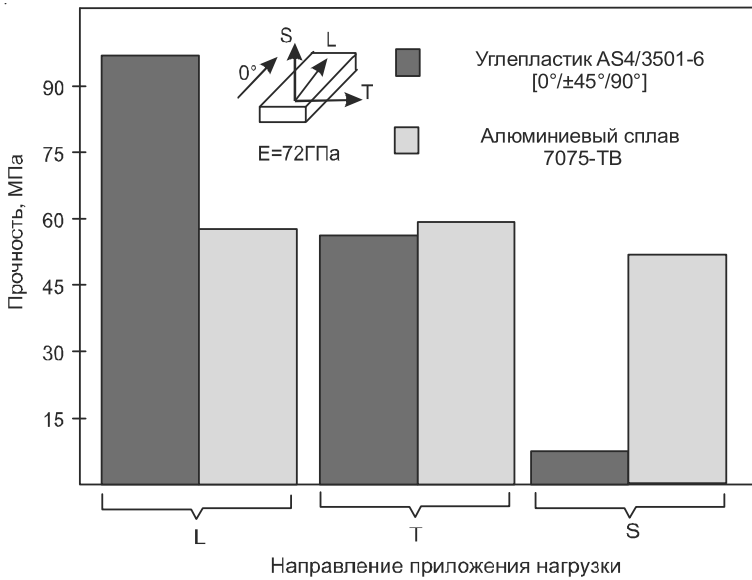



**Рис. 1.11.** Зависимость прочности УП от направления приложения силы [5]

воздействуют на волокнистый наполнитель и матрицу материала, хотя и не так сильно, как высокие. Поглощенная влага приводит к разбуханию матрицы и также снижает ее механические свойства. Кроме того, разбухание матрицы запускает процесс ее теплового деформирования при увеличении температуры. Деформации, возникающие в результате разбухания, могут вызвать изгибы и кручения в конструкции узла или элемента ЛА, в котором применяется ВПКМ, что неизбежно повлияет на его эксплуатационные характеристики. Во время циклов замерзания/оттаивания поглощенная влага за счет циклического увеличения объема (при замерзании) и его уменьшения (при оттаивании), как правило, сопровождается трещинообразованием в матрице, что может даже привести к ее расколу. При стремительном повышении температуры влага, впитанная матрицей, может даже превратиться в пар, что может существенно изменять (увеличивать) напряженное состояние соответствующего объема матрицы. Возникающее внутреннее паровое давление может привести к превышению предела прочности слоистого ВПКМ и его расслаиванию [11].

### 1.2.5. Гальваническая совместимость материалов

Серьезной проблемой при конструировании соединений деталей авиационных конструкций является совместимость материалов, из которых выполнены соединяемые детали [12]. Например, графит обладает катодными свойствами и очень активен с точки зрения гальванического взаимодействия с различными материалами, в частности, ВПКМ на основе углеволоконного наполнителя имеет катодные свойства при соединении с алюминием или кадмием, а легированные стали могут быть несовместимыми с углепластиками в тех случаях, когда на них нанесено покрытие, содержащее кадмий. Наиболее совместимыми материалами для соединения с углепластиками являются титан и его сплавы.

В настоящее время проведены достаточно широкие экспериментальные исследования гальванической совместимости материалов в различных соединениях (см. табл. 1.3). Например, Tucker и др. [13] изучили соединения углепластиков с обычным и упрочненным анодированным алюминием, титаном, нержавеющей сталью и никелево-медным сплавом (монелемом). Образцы были погружены в морскую воду. Из всех испытуемых материалов только титановый сплав избежал коррозии без уменьшения зазора с углепластиком.

**Таблица 1.3.** Гальваническая совместимость металлических материалов с углепластиками [15]

| Материал | Характеристика |
|---|---|
| Титан, титановые сплавы | Эти материалы допускается применять вместе с углепластиками. При наличии крепежных соединений постоянные крепления должны быть герметизированы. В случае применения съемных креплений дополнительная герметизация не обязательна |
| Сплавы на никелиевой основе | Эти материалы гальванически совместимы с углепластиками |
| Высоколегированные нержавеющие стали аустенитного класса | Эти материалы нежелательно применять вместе с углепластиками. В суровых морских и коррозионных средах на креплениях возможно возникновение поверхностной ржавчины. И хотя эти повреждения поверхности крепежа не могут нарушить его целостность, тем не менее они нежелательны. Постоянные крепления должны быть герметизированы. Использование съемных креплений недопустимо по конструктивным соображениям |
| Никелево-медные сплавы | В редких случаях допускается применение этого сплава в соединениях с углепластиком |
| Низколегированные и мартенситные нержавеющие стали | Применение этих сплавов вместе с углепластиками недопустимо из-за интенсивной коррозии |
| Серебряное, хромовое, никелевое покрытие | Эти покрытия совместимы с углепластиками, но непригодны для защиты стали в соединениях с углепластиками. Только в тех случаях, когда в соединениях с углепластиками отсутствуют алюминиевые и титановые элементы, на сталях возможно применение серебряных покрытий |
| Кадмиевые, цинковые и алюминиевые покрытия | Эти покрытия с углепластиками несовместимы из-за интенсивной коррозии покрытий |
| Алюминий, алюминиевые сплавы, магниевые сплавы | Эти материалы с углепластиками несовместимы |

Анодированный алюминий сопротивляется коррозии до тех пор, пока существует покрытие. После удаления покрытия происходит быстрая коррозия, как в металле, так и в углепластике. Эти выводы подтверждаются и другими исследованиями [14].

## 1.3. Соединения в авиационных конструкциях

### 1.3.1. Классификация соединений

Многослойные пакеты листов из различных конструкционных материалов широко используются при изготовлении элементов ЛА. Такой подход обеспечивает высокую структурную эффективность конструкционных материалов, снижение массы ЛА и облегчает его обслуживание. В качестве составных частей этих пакетов в настоящее время все чаще используются композиционные материалы. Типичными пакетами с использованием ВПКМ являются ВПКМ/ВПКМ, ВПКМ/титановый сплав, ВПКМ/титановый сплав/ВПКМ и ВПКМ/алюминиевый сплав. Пакеты, включающие в себя листы из различных материалов, называют ***смешанными пакетами***.

Сборку элементов ЛА и объединение отдельных слоев конструкционных материалов в пакеты выполняют посредством соединений. Требования, предъявляемые к конструкции соединительных узлов, и характер нагрузок, действующих в соединениях, зависят от назначения и условий эксплуатации конкретных элементов ЛА. В соответствии с характером передачи нагрузок в ЛА все соединения деталей и узлов делятся на стыковочные и поддерживающие. В стыковочных соединениях все нагрузки, приходящиеся на стык, воспринимаются металлическими элементами и передаются на корпус изделия через соединительный отсек. Основная особенность поддерживающих соединений заключается в том, что нагрузка на стыке соединяемых деталей передается непосредственно адгезионными прослойками между ними. Примером поддерживающих соединений служат соединения обшивки со стрингерным набором, а также обшивки с сотовым заполнителем [16].

Условно все соединения в зависимости от способа их реализации можно разделить на три вида (табл. 1.4):

1) сплошные (клеевые, формовочные, сварные);
2) механические (клепанные, шпилечно-болтовые, самозаклинивающиеся, сшивные и игольчатые);
3) комбинированные (клееклепанные, клеесшивные, клееигольчатые, клееболтовые, клеерезьбовые и другие сочетания механических и клеевых соединений).

Кроме того, соединения классифицируют по признакам подвижности, разъемности, характеру передаваемой нагрузки, конструктивным

**Таблица 1.4.** Сравнение различных видов соединений [15]

| Вид соединения | | Ожидаемые преимущества | Ограничения |
|---|---|---|---|
| Механические соединения | | - отработанная технология<br>- отправная точка для расчета затрат<br>- может дополнять сварные соединения | - низкая степень риска<br>- большой вес<br>- большая трудоемкость<br>- необходимы дополнительные уплотнители<br>- для уменьшения напряжений необходима регулировка подкладками |
| Сплошные соединения | | - сокращение количества и массы крепежа | - умеренная степень риска<br>- расходы времени на схватывание и отвердение соединения<br>- необходима специальная оснастка |
| Сварные соединения термопластиков | контактные и ультразвуковые | - возможна автоматизация<br>- возможна непрерывная сварка<br>- сокращение количества и массы крепежа | - умеренная степень риска<br>- необходим двухсторонний доступ |
| | индукционные | - достаточно одностороннего доступа<br>- возможна автоматизация<br>- возможна непрерывная сварка<br>- сокращение количества и массы крепежа | - умеренная и высокая степень риска<br>- необходимо применение магнитного токоприемника |
| комбинированные | | - однородное сварное соединение<br>- возможность исключения дополнительных уплотнителей | - низкая степень риска<br>- ограничения по размеру и форме элементов |

особенностям, степени механизации и автоматизации, доступности к месту соединения, сплошности.

***Подвижность*** определяется степенью возможного перемещения в процессе эксплуатации соединения одних его элементов относительно других. В ***неподвижных*** соединениях относительные перемещения его элементов недопустимы.

***Разъемные соединения*** характеризуются возможностью разборки соединения без разрушения. К ***неразъемным соединениям*** относятся сварные, клепаные, паяные, клееные, а также болтовые с большим радиальным натягом.

***По характеру передаваемой нагрузки*** соединения в зависимости от направления действия преимущественной нагрузки подразделяются

на такие, которые работают на срез, и такие, которые работают на растяжение. Большинство соединений работает на срез.

***По конструктивным особенностям*** соединения классифицируются по типу головки крепежного элемента (потайные, плоские, плоскоскругленные, плосковыпуклые, полукруглые шестигранные), по размеру крепежной головки (уменьшенные, нормальные, низкие, высокие), по материалу крепежного элемента, по точности и сложности его исполнения (одноэлементные и составные) и по другим признакам.

***По степени механизации и автоматизации*** выполняемых работ выделяют соединения, выполняемые ручным механизированным инструментом, с помощью стандартного механизированного оборудования и с помощью автоматизированного оборудования.

***По доступности к месту*** соединения делятся на соединения с односторонним или двусторонним подходом.

***Сплошность*** соединения характеризуется удельным весом возможных зазоров между его отдельными элементами. Как правило, по сплошности соединения делятся на соединения с непрерывным швом (сварные, паяные, клеевые) и точечные (сварные, болтовые, заклепочные).

В настоящее время в конструкциях на основе ВПКМ чаще всего встречаются клеевые, заклепочные и шпилечно-болтовые соединения. В агрегатно-сборочном производстве таких конструкций преимущественно используются точечные соединения (до 90%). Несмотря на то что клеевые и механические соединения обладают рядом преимуществ (см. табл. 1.4), их нельзя применять для передачи сосредоточенных нагрузок в соединениях элементов, имеющих большую толщину. В таких случаях широко используют заклепочные соединения [16]. Около 80% точечных соединений составляют заклепочные соединения, что в основном обусловлено значительно большей трудоемкостью изготовления и установки болтового соединения, особенно для высокоресурсных соединений [21].

Выбор вида соединения в конкретной конструкции узла зависит от таких важнейших конструктивно-технологических факторов, как ресурс ЛА, масса конструкции и трудоемкость выполнения соединений. В связи с активным внедрением композиционных материалов в последние годы наметилась тенденция увеличения количества соединений с использованием смешанных пакетов различной конфигурации.

## 1.3.2. Механические соединения

### 1.3.2.1. Клепаные соединения

Наиболее надежным и распространенным в настоящее время является способ соединения элементов конструкции ЛА клепкой. Применение клепки обосновано ее преимуществом перед другими соединениями в прочностном, экономическом и технологическом отношении и, главным образом, степенью освоения и оснащенности технологических процессов. Поэтому при изготовлении узлов, панелей и агрегатов клепка до настоящего времени является наиболее распространенным видом неразъемного соединения, так как она обеспечивает требуемые характеристики прочности, надежности и ресурса работы конструкции. В зависимости от сочетания соединяемых элементов и характера передачи сил с одного элемента конструкции на другой различают следующие виды клепаных швов (рис. 1.12*)*: внахлест, встык с одной накладкой, встык с двумя накладками и стрингерные. Перед соединением деталей заклепками выполняют сверление или пробивание отверстия под заклепку, зенкерование или штамповку гнезда под закладную головку. Заклепывание при потайной клепке включает в себя установку заклепки в отверстие, сжатие деталей, формирование замыкающей головки и контроль качества соединения.

В производстве наиболее широко применяют холодную клепку. При этом способе лучше заполняется отверстие стержнем заклепки, не снижаются механические свойства материалов и значительно облегчается выполнение клепальных работ.

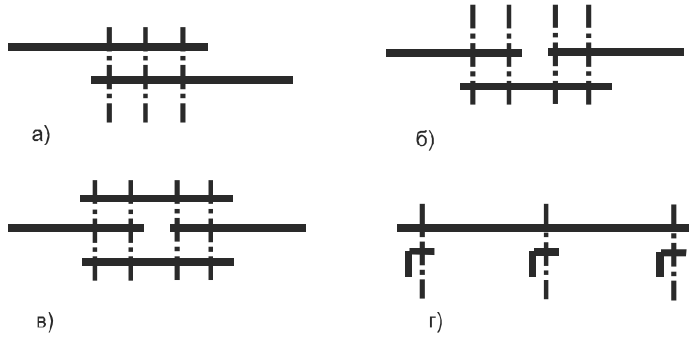



**Рис. 1.12.** Виды клепаных соединений [16]: а – внахлест; б – встык с одной накладкой; в – встык с двумя накладками; г – стрингерные

Заклепки изготавливают из легких сплавов и сталей. По конструктивным особенностям заклепки делят на заклепки с выступающей и с потайной закладными головками. Процесс клепки заключается в осаживании стержня заклепки и формировании из выступающей части стержня замыкающей головки требуемой формы. Следует иметь в виду, что при формировании замыкающей головки стержень заклепки, заполняя отверстие, деформируется неравномерно, причем его диаметр со стороны закладной головки будет меньше, чем со стороны замыкающей головки.

Кроме обычных стержневых заклепок, в ряде производств применяются специальные заклепки. При одностороннем подходе в зону клепки используют заклепки для односторонней клепки: с сердечником, гайки-пистоны, заклепки с высоким сопротивлением срезу. В элементах конструкции, подверженных влиянию больших срезывающих напряжений, для соединений с двухсторонним подходом применяют заклепки с высоким сопротивлением срезу или болты-заклепки.

Одним из важных требований, предъявляемых к целому ряду клепаных конструкций, является обеспечение в процессе эксплуатации соединения необходимой степени герметичности: поддержание избыточного давления, предотвращение утечек по шву, защита различных отсеков и агрегатов от проникновения в них агрессивных жидкостей и газов и т.п.

Формирование замыкающих головок заклепок осуществляют несколькими методами, наиболее распространенными из которых являются клепка ударом, прессованием, а также раскатыванием.

***Клепку ударом*** выполняют, как правило, ручным или пневматическим клепальным молотком. Удары молотка наносят по замыкающей головке, а к закладной головке прижимают поддержку. ***Клепку прессованием*** осуществляют на клепальных прессах. В этом случае заклепку вставляют в отверстие и включают пресс. При работающем прессе автоматически подводится верхний пуансон, пакет сжимается, и с помощью нижнего пуансона образуется замыкающая головка.

***Клепку раскатыванием*** выполняют на специальных раскатных станках или с использованием универсальных сверлильных станков. При этом в процессе клепки происходит сжатие пакета и раскатывание замыкающей головки заклепки специальным пуансоном-раскатником.

В последние годы широко исследуются процессы магнитно-импульсной клепки, клепки с наложением ультразвуковых колебаний, с электронагревом и др.

### 1.3.2.2. Шпилечно-болтовые соединения

Для соединения высоконагруженных конструкций из металлов и ВПКМ используют способы соединения с применением различного вида болтов и шпилек. Особенностью шпилечно-болтового соединения является наличие концевых утолщений в элементах конструкции, радиальных штифтов, болтов (или резьбовых шпилек с гайками и шайбами), расположенных в профилированных отверстиях и пазах концевых утолщений [16].

Проблема создания соединений подобного типа охватывает широкий круг вопросов, включающих выбор параметров формования и механической обработки утолщений, выбор конструктивных параметров крепежных элементов, обеспечение прочности в местах перехода от усиленной утолщенной зоны к основному материалу конструкции. В зависимости от особенностей конструкций, в которых применяют шпилечно-болтовые соединения, и требований к ним, последние выполняют как с наружными, так и с внутренними фланцевыми утолщениями. Формирование краевых утолщений под шпилечно-болтовые соединения в зависимости от назначения конструкции, уровня и характера эксплуатационных нагрузок осуществляют различными способами. Среди этих способов следует отметить специальную намотку кольцевых утолщений, дополнительную приформовку, введение специальных упрочняющих элементов. Введение в зону утолщения высокопрочного изотропного материала (металлической фольги, борных пленок и т.п.) позволяет повысить значения упругих и прочностных характеристик ВПКМ. Так, использование в зоне соединений стеклопластиковых труб дополнительного армирования из боро-алюминиевых лент позволяет повысить прочность конструкции на 20–30% при снижении массы стыка на 10–15% [16].

В ряде случаев высокий уровень нагрузок не позволяет ограничиться однорядными расположениями отверстий под штифты. Тогда применяют многорядные соединения, соединения с шахматным расположением отверстий и другие схемы. При использовании в многорядных соединениях штифтов с формой поперечного сечения в виде овалов, эллипсов и шпилек различной длины благодаря равномерному нагружению всех рядов соединения значительно снижается уровень концентрации напряжений в нем.

### 1.3.2.3. Болт-заклепочные соединения

Повышение работоспособности соединений силовыми точками обеспечивается при наличии не только радиального натяга, но и осевого. Такие возможности создает болт-заклепочное соединение, в котором независимо от квалификации исполнителя достигается усилие сжатия пакета в пределах 60–70% разрушающей нагрузки стержня. Кроме того, в болт-заклепочном соединении возможно создание и радиального натяга, что позволяет повысить ресурс соединения.

Существует два основных типа болт-заклепок – с технологическим хвостовиком и без технологического хвостовика. Их параметры, материал и области использования устанавливаются отраслевыми стандартами.

***Болт-заклепка с технологическим хвостовиком*** (рис. 1.13) состоит из стержня и кольца. Стержень имеет гладкую рабочую часть *1*, закладную головку *2* требуемой формы, продольную часть с накаткой, разделенной шейкой *3* на рабочую часть *4*, и хвостовик *6*, обрезаемый после обжатия кольца *5* с диаметром *D* и высотой *H*. Болт-заклепка и кольцо *5* скрепляют пакет толщиной *S*.

Для деталей этого крепежного изделия в зависимости от метода изготовления его деталей – высадкой или точением – применяют следующие материалы: стержня – Д16П, 30ХГСА или 16ХСН, ВТ16; кольца – Д18, сталь 15, В65, ВТ16, ВТ10, 13Х11Н2В2МФ-Ш и др.

***Болт-заклепка без технологического хвостовика*** состоит из стержня (сталь 30ХГСА или титановый сплав ВТ16) и кольца (сталь 15 или сплавы В65, ВТ16).

Диаметры болт-заклепок находятся в пределах от 3,5 до 10,0 мм.

При практическом использовании таких крепежных изделий необходим обязательный доступ к соединению с двух сторон.

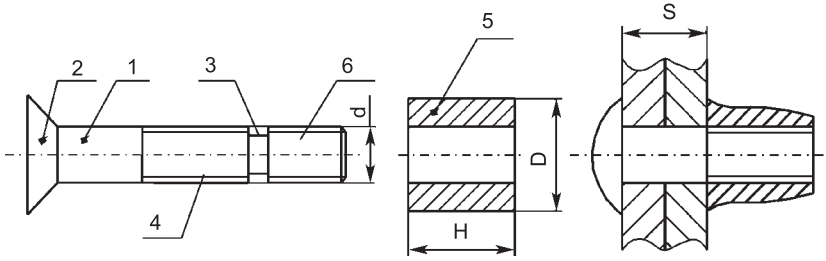



**Рис. 1.13.** Конструкции болт-заклепочных соединений [21]

Болт-заклепочные соединения имеют преимущества по сравнению с другими соединениями:

- в отличие от ударной клепки эти соединения обеспечивают бесшумность и отсутствие вибраций в элементах конструкции;
- в отличие от шпилечно-болтовых соединений эти соединения имеют в 1,5–2,0 раза меньшие трудоемкость и себестоимость при изготовлении и установке, а также в 1,2–1,5 раза меньшую массу;
- по сравнению со шпилечно-болтовыми соединениями у этих соединений усталостная прочность и выносливости на разрыв при тех же материалах элементов значительно выше.

С точки зрения повышения технологичности и прочности соединений в настоящее время уже обозначились следующие тенденции:

- как в герметичных, так и в негерметичных швах при сборке узлов применять вместо болтов болт-заклепки;

**Таблица 1.5.** Предельные отклонения болт-заклепок и отверстий при выполнении соединений [21]

| Диаметр болт – заклепки, мм | Материал стержня | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Д16П | | | | 30ХГСА, ВТ16 | | | | 30ХГСА, ВТ16 | | | ВТ16 | | |
| | Посадка, мкм | | | | | | | | | | | | | |
| | h10 | | Специальная | | h10 | | p6 | | Переходная | | | Натяг | | |
| | с | о | с | о | с | о | с | о | с | о | | с | о, натяг, % | |
| | | | | | | | | | | с. хв | без. хв | | 0,54–1,2 | 0,3–1,2 |
| 3,5 | h8 | H10 | +100 | H12 | – | – | p6 | – | – | – | – | – | – | – |
| 4,0 | h8 | H10 | +100 | H12 | h10 | H10 | p6 | H7 | +22; +4 | H9 | H7 | – | – | – |
| 5,0 | h8 | H10 | +100 | H12 | h10 | H10 | p6 | H7 | +22; +4 | H9 | H7 | +60; +40 | H7 | H9 |
| 6,0 | h8 | H10 | +150 | H12 | h10 | H10 | p6 | H7 | +22; +4 | H9 | H7 | +72; +48 | H7 | H9 |
| 8,0 | h8 | H10 | +150 | H12 | h10 | H10 | p6 | H7 | +22; +6 | H9 | H7 | +96; +62 | H7 | H9 |
| 10,0 | – | – | – | – | h10 | H10 | p6 | H7 | +22; +6 | H9 | H7 | +120; +70 | H7 | H9 |

*Примечание*: «с» – стержень, «о» – отверстие, хв. – хвостовик

- если в соединении элементы конструкции имеют уклоны, устанавливать закладную головку стержня со стороны элемента меньшей толщины и поверхности пакета, перпендикулярной оси отверстия.

Следует отметить, что на практике для соединения металлических деталей применяются посадки болт-заклепок как с зазором, так и переходные и с натягом (см. табл. 1.5). Натяг может достигать 1,2% диаметра стержня. Следует обратить внимание на то, что при соединении деталей из ВПКМ и смешанных пакетов посадки с натягом использовать не рекомендуется, поскольку натяг может привести к расслаиванию ВПКМ еще при установке крепежа [5].

### 1.3.3. Несущая способность соединений

Известно, что ресурс ЛА в целом определяется ресурсом его планера. Кроме того, известно, что основной причиной нарушения работоспособности планера являются усталостные разрушения, до 80% которых начинаются в местах соединений его элементов [21]. Несущую способность соединений и их ресурс определяют конструктивные, технологические и эксплуатационные факторы (см. рис. 1.14).

К ***конструктивным факторам*** относят вид соединения, его геометрические параметры, материалы крепежных элементов и др.

К сожалению, единых рекомендаций по конструированию соединений смешанных пакетов, включающих ВПКМ, пока еще не разработано. Вместе с тем уже приобретенный на сегодня опыт эксплуатации ЛА свидетельствует о том, что прочность и надежность элементов его конструкции в значительной степени зависят от выбранного вида соединения. Рациональность применения того или другого вида соединения определяется как маркой материала, так и толщиной элементов собираемой конструкции. Например, результаты исследований [21] показывают, что с точки зрения концентрации напряжений наибольшая эффективность клеевых соединений обеспечивается при толщине соединяемого пакета 0,8–1,2 мм; заклепочных соединений – при толщине пакета 1,5–3,0 мм, болтовых соединений – при толщине пакета более 3,0 мм.

***Технологические факторы*** определяют структурные параметры ВПКМ, его физико-механические характеристики и остаточные напряжения, возникающие в процессе изготовления соединений. Среди этих факторов следует выделить натяг заклепок и болтов, усилие

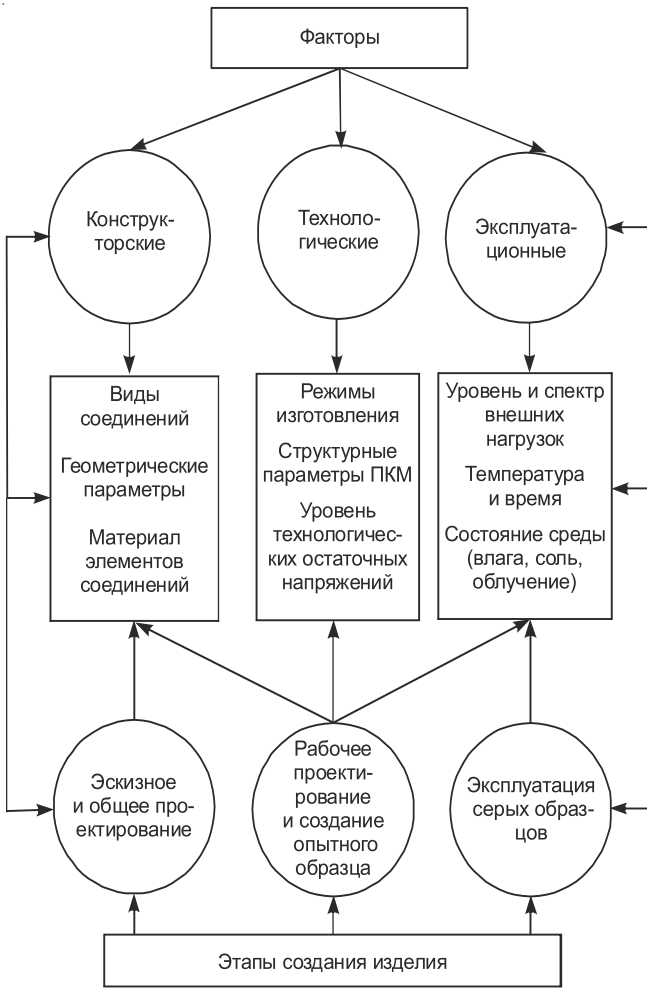



**Рис. 1.14.** Факторы, определяющие несущую способность соединений [16]

затяжки болтов и шпилек, точность и взаимозаменяемость элементов, усадочные напряжения в ВПКМ, качество изготовления отверстий и резьбы.

К ***эксплуатационным факторам*** следует отнести уровень и спектр внешних нагрузок, время и температуру эксплуатации, требуемый

ресурс работы элемента конструкции, воздействие внешней среды (например, влияние влаги на клеевую прослойку).

На стадии проектирования могут быть учтены не все факторы, определяющие несущую способность соединений, а только лишь некоторая часть из них. Отдельные факторы могут проявляться на стадии отработки технологии изготовления элементов соединения, а некоторые – только на стадии эксплуатации опытных конструкций [16].

Наиболее эффективным методом повышения несущей способности неразъемных соединений металлических деталей является обеспечение осевого и особенно радиального натягов [17]. Методы повышения ресурса соединений металлических деталей в основном предусматривают создание благоприятных остаточных напряжений в области отверстия. Исследования показывают, что создание повышенного радиального натяга при одних и тех же создаваемых им остаточных напряжениях увеличивает ресурс соединения (рис. 1.15). Вместе с тем дальнейшее повышение ресурса крепежных соединений за счет натягов часто сдерживается недостаточным сопротивлением многих современных сплавов, находящихся в напряженном состоянии, коррозионному растрескиванию [17].

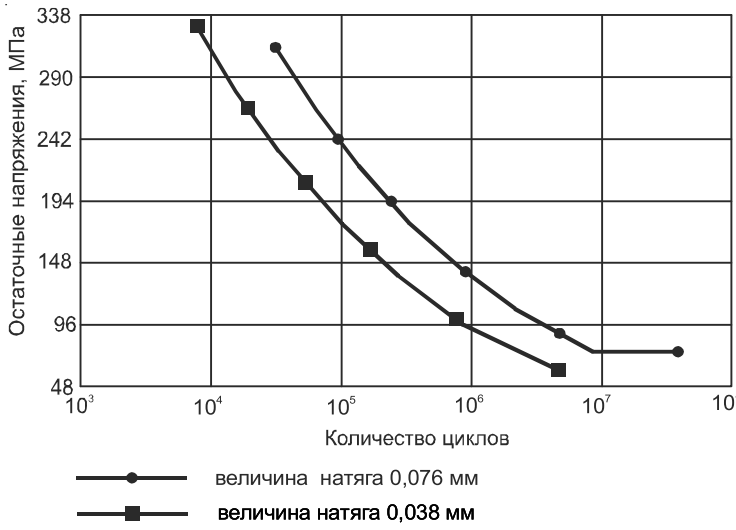



**Рис. 1.15.** Влияние радиального натяга в шпилечно-болтовых соединениях на их ресурс [17]

Ресурс металлических соединений начинает возрастать при достижении значений радиального натяга 0,8–1,5% и больше. В данном случае верхний предел определяется коррозионным растрескиванием, в том числе из-за возможного нарушения покрытия крепежного элемента. Накопленный опыт свидетельствует о том, что требуемый радиальный натяг в соединениях обеспечивается в основном посадкой болтов или заклепок в собираемом пакете, наличием компенсатора (для сплошных заклепок – выступающей части над головкой), а также наличием конической поверхности стержня [17].

При механическом соединении деталей из ВПКМ и смешанных пакетов (в отличие от пакетов из металлических деталей) существенным является смятие внешних листов в области отверстий. Часть нагрузки также передается за счет трения на поверхностях соединяемых элементов. Однако для обеспечения необходимых для передачи усилий высоких значений силы трения между элементами соединения важно обеспечивать не только большую силу затяжки болтового соединения, но и достаточную прочность на смятие слоев собираемого пакета. Именно низкая прочность на смятие слоев пакета из ВПКМ часто делает невозможным сохранение высокой силы затяжки болтов во время длительного периода эксплуатации соединения, приводит в отличие от соединений металлических элементов (рис. 1.16а) к неравномерному распределению сил затяжки болтов (рис. 1.16б) и в результате к потере несущей способности соединения.

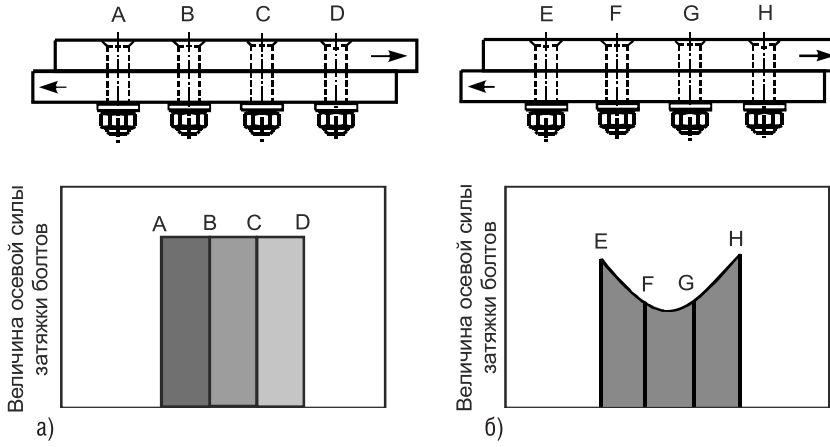



**Рис. 1.16.** Распределение сил затяжки болтов в соединениях металлических деталей (а) и соединениях деталей из ВПКМ (б) [5]

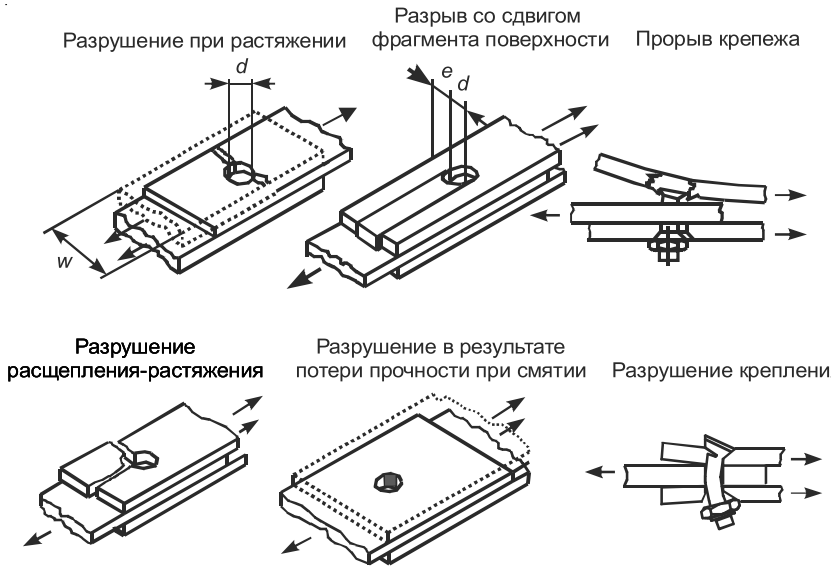



**Рис. 1.17.** Виды повреждений соединений деталей из ВПКМ [18]

Для соединений деталей из ВПКМ характерны специфические виды повреждений в зависимости от направленности действующей нагрузки. При растяжении главным видом повреждения являются разрыв, смятие и срез (рис. 1.17). Возможно смешанное повреждение, которое включает разрыв со сдвигом фрагмента поверхности. В глубоко посаженных отверстиях может возникнуть прорыв соответствующего слоя – разрушение, при котором головка болта прорывает ВПКМ. Вид разрушения зависит от отношения эффективной ширины листа к диаметру отверстия для крепежа ($w/d$) и отношения расстояния от края листа до поверхности отверстия к диаметру этого отверстия ($e/d$).

Прочность и сопротивление усталостному разрушению шпилечно-болтовых и клепаных соединений в конструкциях из ВПКМ в основном определяются уровнем концентрации напряжений в зоне около отверстий. Начальные напряжения в соединениях такого типа обусловлены применением шпилек, штифтов и болтов, устанавливаемых с натягом или со значительной осевой затяжкой, что создает в зоне около отверстий напряженное состояние, которое значительно изменяет прочностные характеристики механических соединений при

действии внешних нагрузок. Испытания на усталость болтовых соединений смешанных пакетов, включающих листы алюминиевого сплава с покрытием, титанового сплава, кевлара и углепластиков, показывают, что из всех материалов пакета первыми начинают разрушаться и поддаются расслаиванию листы из ВПКМ. Армирование ВПКМ пакета в зоне стыка металлической фольгой или высокопрочными пленками позволяет повысить механические характеристики соединения в целом и снизить массу конструкции [14].

Один из способов уменьшения остаточных напряжений, возникших вследствие выполнения технологических операций в зоне клепки, является применение высокопрочных заклепок переменной жесткости, имеющих специальную геометрическую форму и позволяющих значительно уменьшить усилие клепки и, соответственно, остаточные напряжения. Для повышения местной прочности пакета из ВПКМ следует использовать, если это допустимо конструкцией, металлические шайбы, которые устанавливаются под замыкающую головку заклепки. Это также приводит к значительному уменьшению технологических остаточных напряжений в зоне клепки и улучшает качество соединения. Применение заклепок с промежуточным элементом, выполненным в виде обжимающих стержень заклепки колец, модуль упругости которых больше, чем у заклепки, также приводит к уменьшению контактного давления на сопрягаемых поверхностях заклепки и стенках отверстия, что делает возможным осуществление клепки многослойных пакетов с легким заполнителем [16].

### 1.3.4. Масса элементов соединений

Современные авиационные конструкции могут содержать тысячи узлов и сотни тысяч крепежных элементов. Действительно, при сборке типового истребителя устанавливается 200–300 тыс. заклепок, при сборке коммерческого или транспортного самолета 1,5–3,0 млн заклепок в зависимости от размеров ЛА. Для установки каждой заклепки необходимо изготовить отверстия в соединяемых деталях. Общая масса болтов и заклепок, например, на самолете США С-5А, составляет около 3900 кг. Таким образом, снижение массы соединений достаточно существенно влияет и на уменьшение общей массы как планера, так и ЛА в целом.

Традиционно это достигается путем увеличения доли заклепочных соединений, которые имеют наименьшую массу. Количество за-

клепочных соединений в планере может достигать до 80% от общего количества крепежных точек [1]. В последние десятилетия заметно расширилось применение для элементов соединений титановых сплавов. Практически все виды соединений: болты, болты-заклепки, заклепки сплошные, составные одностороннего крепежа и детали – применяются в исполнении из титанового сплава ВТ16.

Другой тенденцией является сокращение количества крепежных элементов за счет укрупнения узлов. Существуют концептуальные конструкции ЛА, в которых количество металлических деталей уменьшено в 10–20 раз, деталей из композиционных материалов в 3–4 раза. В совокупности это позволяет уменьшить количество крепежных элементов почти в 25 раз. Снижение количества крепежных элементов значительно снижает затраты на сборку и длительность цикла сборки практически любого ЛА [19].

### 1.3.5. Трудоемкость выполнения соединений

Комплексные конструкторско-технологические решения при проектировании новых ЛА способствуют повышению ресурса, уменьшению массы конструкции и трудоемкости сборки, а также повышают эффективность использования прогрессивных видов соединений в целом. Затраты на реализацию каждого вида соединений различны (см. табл. 1.6). Сварные соединения выполняются с наименьшими, заклепочные – со средними, а болтовые – с наибольшими затратами.

Поскольку в конструкциях ЛА до 75–90% соединений может быть выполнено с помощью заклепочных соединений, разработчики клепаных конструкций наравне с прочностными требованиями к ним ставят требования технологичности производства, в частности, клепаные конструкции соединений необходимо проектировать таким образом, чтобы они обеспечивали их механизированное или даже автоматизированное выполнение [20], что позволяет существенно уменьшить трудоемкость и технологическую себестоимость заклепочных соединений по сравнению с ручным их изготовлением механизированным инструментом (см. табл. 1.7) [21].

Значительное снижение трудоемкости выполнения заклепочных соединений происходит в случае применения заклепок с односторонним доступом, так как при этом исключается более трудоемкая ударная клепка, выполняемая, как правило, двумя исполнителями.

**Таблица 1.6.** Затраты и коэффициент стоимости на установку 1000 силовых точек клепаных соединений, выполненных различными способами [21]

| Способ выполнения соединения | Затраты, у.е. | Коэффициент стоимости |
|---|---|---|
| Сверление дрелью и ручная клепка | 3,71 | 4,7 |
| Сверление дрелью и одиночная прессовая клепка | 2,56 | 3,3 |
| Механизированное сверление и групповая прессовая клепка | 2,04 | 2,7 |
| Автоматическая клепка | 0,99 | 1,3 |
| Сварка ТЭС: | | |
| - алюминиевых сплавов | 2,11 | 2,7 |
| - нержавеющих сталей | 0,60 | 0,8 |
| Сварка на роликовой машине: | | |
| - алюминиевых сплавов | 0,79 | 1,0 |
| - нержавеющих сталей | 0,33 | 0,43 |
| Сборка на болтах: | | |
| - соединение 10–12 квалитета точности | 16,91 | 14,0–17,6 |
| - соединение 6–8 квалитета точности | 10,30–13,41 | – |
| - высокоресурсные (с натягом) | 22,0 | – |

**Таблица 1.7.** Относительная трудоемкость и технологическая себестоимость заклепочного соединения при разной степени механизации и автоматизации [21]

| Средства механизации и автоматизации при клепке | Трудоемкость изготовления шва, % | Технологическая себестоимость, % |
|---|---|---|
| Сверление, зенкование отверстий и клепка ручным механизированным инструментом | 100 | 100 |
| Сверление, зенкование отверстий на радиально-сверлильном станке; одиночная клепка на прессе | 48 | 32 |
| Изготовление отверстий и их подготовка с помощью СУЗ; групповая клепка на прессе | 23 | 21 |

Болтовые соединения выполняются в основном с помощью ручного механизированного инструмента. Следует отметить, что технически возможно создание автоматов для скрепления элементов болтового соединения по всему технологическому процессу его изготовления.

Наиболее трудоемким элементом технологического процесса выполнения болтового соединения в металлических деталях является изготовление и чистовая обработка отверстий. Например, при созда-

нии болтового соединения по шестому квалитету точности более 70% трудоемкости приходится на изготовление и чистовую обработку отверстий с помощью разверток. При использовании протяжек доля времени, приходящаяся на изготовление и чистовую обработку отверстий, снижается до 36% общей трудоемкости выполнения соединения. Более 20% трудоемкости приходится на вставку болта, установку шайбы, наживление и завинчивание гаек. Следует обратить внимание на то, что последние три перехода этой технологической операции изготовления неподвижного соединения в случае использования заклепок отсутствуют. При проектировании конструкции неподвижного крепежного соединения следует иметь в виду также и то, что с увеличением диаметра болта трудоемкость изготовления соединения при его установке возрастает. Например, трудоемкость установки крепежных деталей болтового соединения диаметром 18 мм вдвое больше трудоемкости установки крепежных деталей с диаметром болта 8 мм [21].

### 1.3.6. Примеры выполнения соединений высоконагруженных узлов и деталей

**Соединения обшивок с элементами каркасов**. Самими многочисленными и ответственными в конструкциях летательных аппаратов являются соединения обшивки с элементами каркаса (стрингерами, шпангоутами, лонжеронами и нервюрами), подверженными при эксплуатации ЛА воздействию касательных напряжений. На рис. 1.18 приведены примеры конструкторско-технологических решений (КТР) соединения обшивки с лонжеронами, изготовленными из различных материалов: металлическим (рис. 1.18а), из ВПКМ, в частности углепластика (рис. 1.18б), композитным (рис. 1.18в) [16].

Наибольшей несущей способностью и жесткостью обладает КТР соединения, в котором обшивка (поз. 2) присоединена к металлической полке лонжерона (поз. 1) с помощью следующих крепежных элементов (рис. 1.18а): заклепки (поз. 3), болта (поз. 4), гайки (поз. 5) и шайбы (поз. 6). Для соединения композитных конструкций элементов крыла в настоящее время наиболее часто успешно применяются КТР, представленные на рис. 1.18б, в, где обшивка (поз. 2) присоединена к полке лонжерона (поз. 1), изготовленного из ВПКМ с помощью болтовых крепежных элементов: болта (поз. 3), гайки (поз. 4) и шайбы (поз. 5).

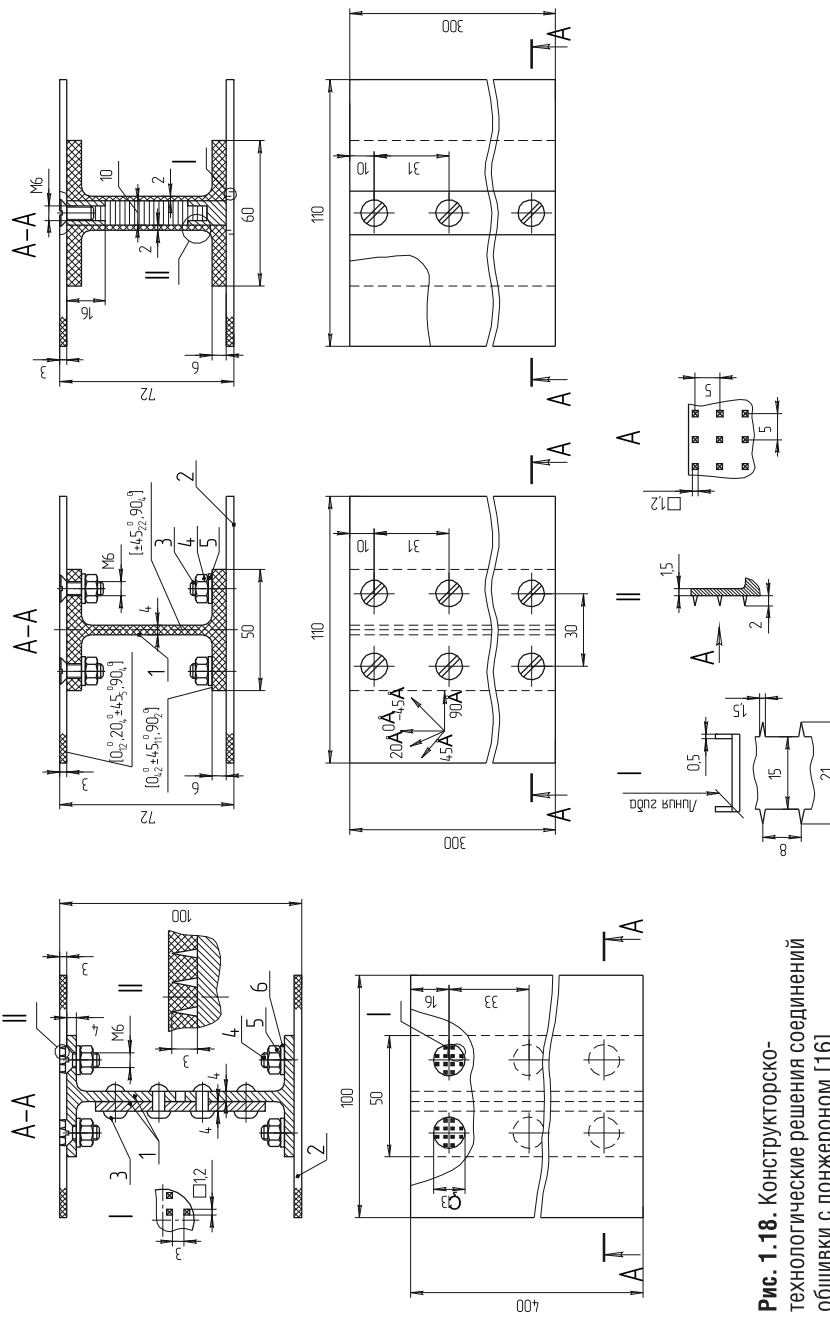


**Рис. 1.18.** Конструкторско-технологические решения соединений обшивки с понжероном [16]

**Стыки и соединения лонжеронов и силовых нервюр**. Конструкторское решение соединения композитного лонжерона и силовых нервюр приведено на рис. 1.19. Напряжения с полок лонжеронов (поз. 1) на обшивку крыла передаются с помощью двух накладок из сплава Д16АТ (поз. 2), образующих горизонтальный стыковочный узел. Внутренние

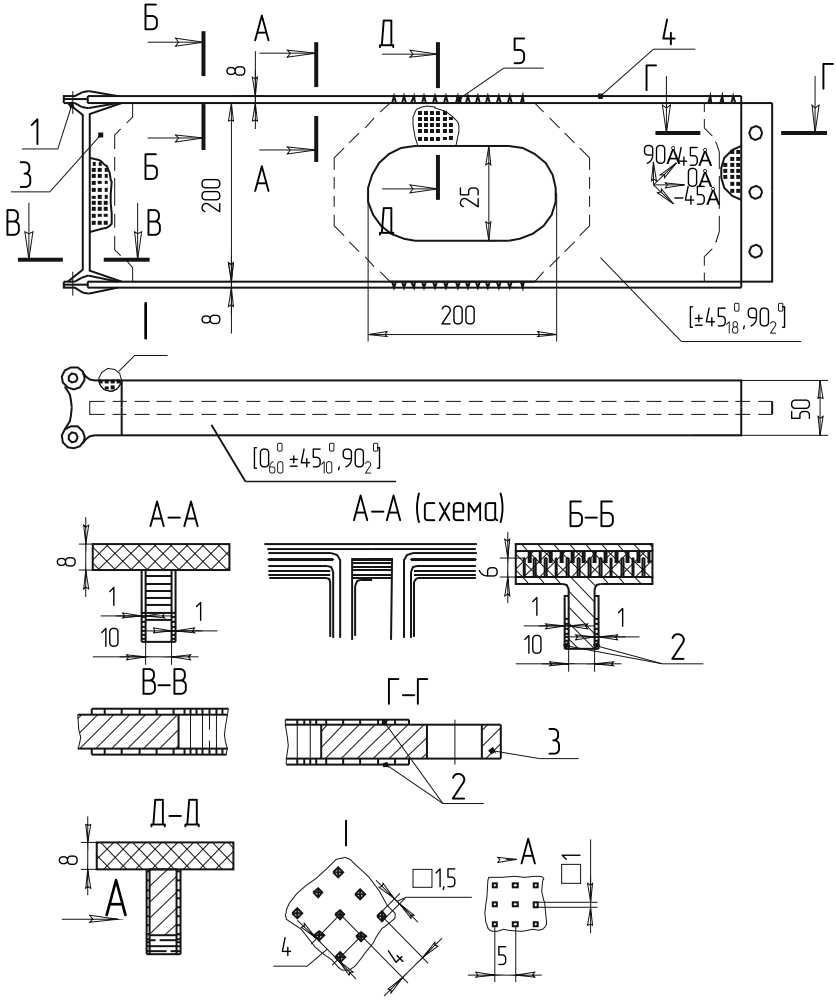



**Рис. 1.19.** Конструкторское решение соединения композитного лонжерона и силовых нервюр [16]

накладки изготовлены совместно со стойкой (поз. 3), которая закреплена между несущими слоями трехслойной стенки лонжерона (поз. 4). На накладках и стойке фрезерованием образованы пирамидальные крепежные элементы (поз. 5).

Конструкция нервюры элерона крыла из углепластика приведена на рис 1.20. Нижний узел нервюры является осью вращения элерона, а к верхнему присоединяется управляющий (отклоняющий) силовозбудитель. Нервюра представляет собой два пояса двутаврового поперечного сечения, формуемые за одну технологическую операцию

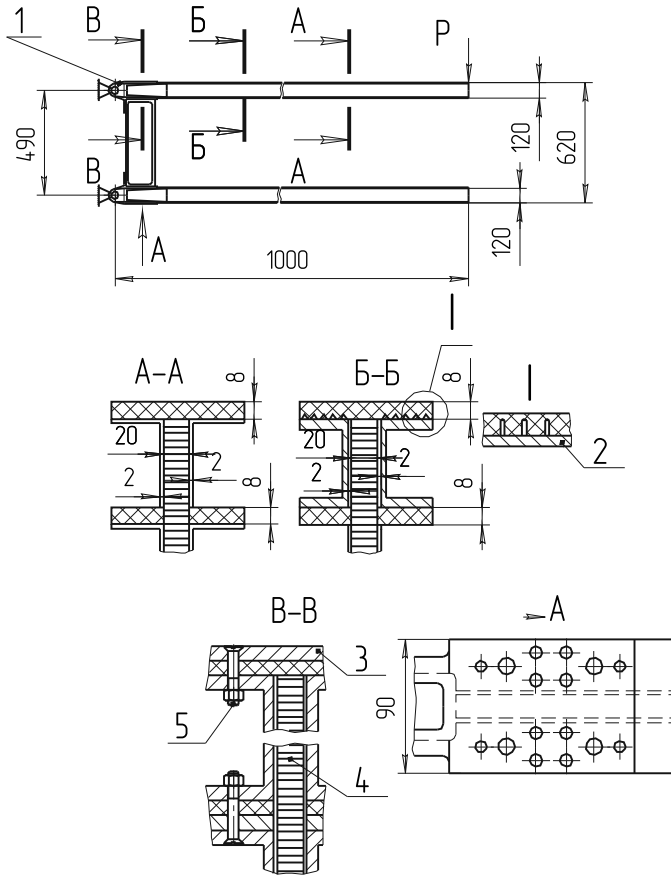



**Рис. 1.20.** Конструкторское решение фрагмента силовой нервюры крыла из ВПКМ [16]

вместе с трехслойной общей стенкой с заполнителем типа сотопласт. Стыковые вилки (поз. 1) узлов образованы внутренними фитингами (4 шт.), имеющими приваренные крепежные элементы диаметром 1,5 мм и приформованными к полкам поясов (поз. 2) при изготовлении нервюры.

После извлечения конструкции из оснастки и подготовки поверхности устанавливают на клее внешние охватывающие фитинги (поз. 3) и дополнительно соединяют с внутренней композитной (или металлической) стойкой (поз. 4) при помощи болтов диаметром 4–5 мм (поз. 5) [21].

## 1.4. Краткая характеристика рабочих процессов

Формирование отверстий для выполнения механических соединений является одной из ответственных и дорогостоящих операций. Теоретически для формирования отверстий в пакетах могут применяться различные рабочие процессы, включая гидроабразивную резку, лазерную резку и электроэрозионную обработку. Однако специфические условия сборочного производства ЛА существенно сужают круг возможных рабочих процессов, ограничиваясь, как правило, процессами резания.

### 1.4.1. Резание осевым инструментом

Обработка осевым инструментом предполагает придание вращательного движения инструменту со скоростью резания и его осевое перемещение с заданной подачей. Столь простая кинематика процесса в сочетании с возможностью ее реализации как ручным инструментом, так и автоматизированными машинами, а также относительно низкая стоимость обработки делают эту группу рабочих процессов в сборочном производстве наиболее широко распространенной и доступной среди всех методов обработки отверстий.

К группе рабочих процессов осевой обработки резанием относят сверление, зенкерование, развертывание и протягивание. Одним и тем же режущим инструментом могут быть обработаны различные по своей природе материалы: металлы и их сплавы, стекло, керамика, ВПКМ и др. Возможна и эффективная обработка отверстий в смешанных пакетах, состоящих из разнородных материалов.

Основной особенностью указанных рабочих процессов, в частности сверления, является возникновение значительной осевой силы вдоль оси отверстия, что при обработке ВПКМ вызывает расслаивание на входе и выходе инструмента, образование межслоевых трещин и другие повреждения отверстий (см. раздел 2). В связи с этим основным направлением совершенствования указанных рабочих процессов должно быть уменьшение осевой силы за счет модернизации геометрии режущих инструментов. Это, прежде всего, специальные заточки и подточки режущих кромок, а также использование комбинированных инструментов, совмещающих в себе процессы сверления, зенкерования и развертывания.

Для повышения стойкости инструментов применяют новые инструментальные материалы и покрытия, вводят особые требования не только к геометрическим параметрам инструментов, в том числе к радиусу округления режущей кромки, но и к качеству режущих кромок и шероховатости рабочих поверхностей лезвий, а также другие требования.

### 1.4.2. Спиральное фрезерование

В последние годы спиральное фрезерование становится в некоторых случаях хорошей альтернативой процессу сверления. В зарубежной литературе достаточно прочно укрепилось еще одно название этого процесса – «орбитальное сверление» (*orbital drilling*). Спиральное фрезерование может применяться для обработки отверстий в металлах и их сплавах, стекле, керамике, ВПКМ и других материалах.

С точки зрения кинематики обработки процесс спирального фрезерования представляет собой фрезерование с винтовой (спиральной) подачей, при котором вращающийся со скоростью резания относительно своей оси инструмент (концевая фреза) совершает дополнительно к осевому движению подачи вращательное движение подачи, ось которого проходит через ось формируемого отверстия. Таким образом, ось вращения фрезы смещена относительно оси изготавливаемого отверстия, а сам инструмент относительно заготовки движется по спиральной линии. В силу такой кинематики в процессе спирального фрезерования возникают осевые силы, во много раз меньшие, чем при сверлении. Это обеспечивает значительное улучшение качества отверстий в ВПКМ за счет уменьшения расслаивания. Мелкая стружка, формируемая при спиральном фрезеровании пластичных

материалов, улучшает удаление стружки из зоны резания и исключает повреждение уже обработанной поверхности отверстия. Отсутствие постоянного контакта лезвий инструмента (фрезы) с заготовкой, работающих по циклу «резание – отдых», уменьшает температуру нагрева инструмента и температурного воздействия на заготовка, также способствует дополнительному повышению качества обработанной поверхности и стойкости инструмента.

Размер отверстия при спиральном фрезеровании в значительной степени определяется траекторией движения фрезы и ее размерами. С одной стороны, это дает возможность обработки одним инструментом отверстий разного диаметра и уменьшает позиционное отклонение отверстия, с другой – точность размера и погрешность формы отверстия во многом зависят от точности перемещения рабочих органов машины, реализующей процесс, и жесткости технологической системы.

Для реализации процесса спирального фрезерования необходимо использование оборудования, обеспечивающего спиральное движение высокоскоростного (10–20 тыс. об/мин и более) шпинделя. Такое оборудование не только более сложное, чем традиционные (например, сверлильные) станки для осевой обработки, но и имеет большую массу, чем масса традиционных сверлильных машин. Следует отметить, что процесс спирального фрезерования характеризуется наличием значительных радиальных усилий, что требует при обработке отверстий указанным методом обязательного применения кондукторов для закрепления этих машин.

Таким образом, спиральное фрезерование является одним из перспективных процессов обработки отверстий, особенно большого диаметра, применение которого позволяет достигнуть приемлемых параметров качества обработанных поверхностей в деталях из ВПКМ, практически исключая такие повреждения отверстий, как расслаивание на входе и выходе инструмента и межслоевые трещины при повышенной производительности обработки. Начальные более высокие затраты на оборудование и инструмент при внедрении этого процесса могут окупиться в будущем за счет снижения текущих затрат, повышения производительности обработки и существенного снижения брака.

### 1.4.3. Вырубка

Вырубка – это метод обработки металлов и других конструкционных материалов давлением, при котором обрабатываемый материал испытывает воздействие значительных сдвигающих напряжений, особенно превышающих предел текучести материала. Процесс реализуется с помощью специальных устройств или штампов. Отделение одной части материала от другой в процессе реализации этого процесса происходит в результате сдвиговых деформаций. Вырубка широко применяется на заготовительной и окончательной стадиях производства. Достоинством вырубки по сравнению с другими процессами механической обработки являются ее относительно низкая энергоемкость на единицу обрабатываемого материала и высокая производительность. Вырубка может применяться для обработки отверстий в пластичных материалах, например, в металлах и их сплавах, а также в некоторых видах ВПКМ.

Ограничивающими факторами при применении данного метода обработки для формирования отверстий в пакетах, в том числе и с ВПКМ, являются ограниченная толщина элемента (обшивка, полка и др.), которая существенно зависит от свойств материала; ограниченный набор обрабатываемых материалов, вырубка которых возможна с приемлемым качеством поверхности; необходимость использования подкладки с ответной стороны элемента, в котором формируется отверстие.

### 1.4.4. Гидроабразивная резка

В основе рабочего процесса гидроабразивной резки лежит принцип эрозионного воздействия на обрабатываемый материал смеси высокоскоростной струи, как правило, водяной, содержащей твердые абразивные частицы. Физическая сущность механизма гидроабразивной резки состоит в отрыве («резании – царапании») и уносе из зоны резания частиц материала скоростным потоком двухфазной («жидкость – твердофазные абразивные частицы») струи. Устойчивость подачи и эффективность воздействия этой двухфазной струи обеспечиваются оптимальным выбором целого ряда параметров резки, включая давление и расход воды, а также расход и размер частиц абразивного материала.

Гидроабразивная резка может применяться для обработки широкого ассортимента материалов, в том числе пластичных металлов и

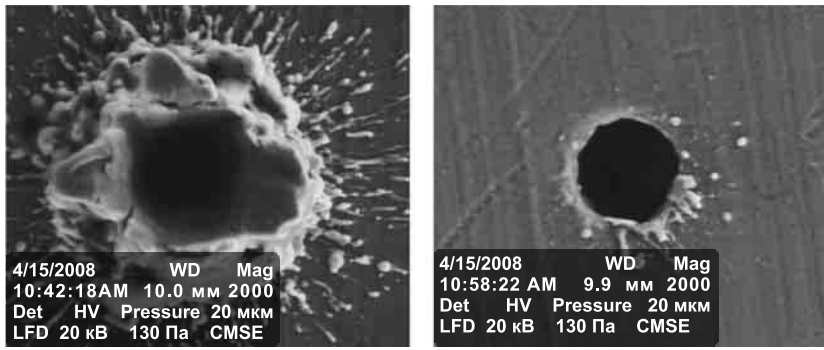
сплавов, а также ВПКМ в листах толщиной до 230 мм. Малая осевая сила и отсутствие расслаивания ВПКМ в процессе обработки, простота оснастки и инструмента, отсутствие температурного воздействия, отсутствие токсичных испарений или газов, относительно низкая шероховатость поверхности (до Ra 1,6 мкм) и достигаемая высокая размерная точность отверстия (до 0,02 мм) делает гидроабразивную резку перспективным процессом для обработки как ВПКМ, так и смешанных пакетов.

Однако в условиях стапельной сборки деталей ЛА, когда необходимо обрабатывать большое количество отверстий относительно малого диаметра, как правило, не допускается применение дополнительных жидкостей и абразива и требуется соблюдение чистоты рабочего места, гидроабразивная резка имеет ограниченное применение. Практическое использование этого прогрессивного процесса формирования новых поверхностей связано с необходимостью создания ванн для сбора жидкости и абразива, а также с выполнением первоначальной прошивки каждого отверстия и учетом «увода» струи в направлении, противоположном ее перемещению.

### 1.4.5. Лазерная резка

В рабочем процессе лазерной резки сфокусированный лазерный луч, обычно управляемый компьютером, обеспечивает высокую концентрацию энергии и позволяет разрезать практически любые материалы независимо от их теплофизических свойств. В процессе резки под воздействием лазерного луча материал разрезаемого участка плавится, возгорается, испаряется или выдувается струей газа (рис. 1.21). При этом можно получить относительно узкие резы с минимальной зоной термического воздействия.

Лазерная резка отличается отсутствием механического воздействия на обрабатываемый материал. В результате этого происходят минимальные силовые деформации – как в процессе резки, так и после завершения обработки. Вследствие этого лазерную резку даже легкодеформируемых и нежестких заготовок и деталей можно осуществлять с высокой степенью точности. Благодаря большой мощности лазерного излучения обеспечивается высокая производительность процесса в сочетании с высоким качеством поверхностей реза материала. Легкое и сравнительно простое управление лазерным излучением позволяет осуществлять лазерную резку по сложному контуру плоских и




Входное отверстие Выходное отверстие

**Рис. 1.21.** Отверстия, изготавливаемые лазером при прошивке[1]

объемных деталей и заготовок с высокой степенью автоматизации процесса.

Вместе с тем термическая деструкция ВПКМ при лазерной резке, оплавление кромок формируемых этим способом поверхностей снижают их качество, а следовательно, и прочность соединения в целом. Это в сочетании с повышенной задымленностью окружающей среды в процессе обработки, высокой стоимостью оборудования и существенным падением минутной подачи с увеличением толщины слоев существенно ограничивает применение лазерной резки при изготовлении отверстий в пакетах, содержащих ВПКМ.

### 1.4.6. Электроэрозионная обработка

Электроэрозионная обработка заключается в контролируемом разрушении (электрической эрозии) электропроводного материала под действием электрических разрядов между двумя электродами. Одним из электродов является обрабатываемая заготовка, другим – инструмент. Разряды возникают периодически (импульсно) так, чтобы среда между электродами восстановила свою электрическую прочность. Для уменьшения эрозии электрода – инструмента для разрядов – используются униполярные импульсы тока.

[1] По материалам сайта : www.edmmatters.com/CategoryView,category, Surface%2BFinish.aspx.

Необходимым свойством инструмента и обрабатываемого материала для реализации этого процесса является их электропроводность. По этой причине электроэрозионная обработка может использоваться только для электропроводных ВПКМ, в частности, содержащих графит (графито-эпоксидные ламинаты), который и обеспечивает электропроводность материала. Такой вид обработки электропроводных ВПКМ позволяет обеспечить достаточно высокое качество обработанных поверхностей и возможность обработки элементов сложной конфигурации с высокими требованиями к размерной точности, но является практически недоступным для материалов-диэлектриков.

Отверстия в ВПКМ получают путем прошивки электродом – инструментом, имеющим специальную форму. Инструмент подается сверху вниз под контролем следящей системы, служащей для поддержания постоянного зазора между заготовкой и самим инструментом. При больших значениях тока высокая температура вызывает тепловое расширение графита в тангенциальном направлении, что может сопровождаться нарушением адгезионных связей между слоями матрицы и ее расслаивание.

В силу необходимости реализации электроэрозионного процесса в специальной (диэлектрической) жидкой среде, например, на основе минерального масла, на стационарном оборудовании, которое обеспечивает сравнительно невысокую производительность, но достаточно высокое энергопотребление, этот метод имеет в сборочном производстве ЛА очень ограниченное применение.

## Выводы

1. Наблюдаемое увеличение стоимости летательных аппаратов, несмотря на повышение эффективности проектирования и изготовления, связано с увеличением использования более дорогих компонентов и узлов, а также с тенденцией применения для максимальной экономии веса дорогостоящих ВПКМ и титановых сплавов.
2. В современных самолетах широко применяются как металлические материалы (титановые и алюминиевые сплавы), так и ВПКМ. Использование ВПКМ в узлах ЛА постоянно растет, хотя и не так стремительно, как предполагалось ранее. И это, несмотря на существенное сокращение веса конструкций и другие преимущества, которые могут обеспечить ВПКМ. В силу недостаточной изученности свойств ВПКМ и еще ограниченной области их применения

в реальных конструкциях корпуса и двигатели ЛА будут и далее представлять собой комбинацию различных материалов: узлы и элементы конструкции будут включать ВПКМ и металлические сплавы различных типов и марок, баланс в выборе которых будет зависеть от конструкторских и экономических факторов.

3. Самым надежным и распространенным в настоящее время является способ соединения элементов конструкции самолета клепкой. Для соединения высоконагруженных конструкций, в том числе и из ВПКМ, чаще всего используют способы с применением различного вида болтов и шпилек.
4. Наиболее эффективным методом повышения выносливости неразъемных соединений металлических деталей является обеспечение осевого и радиального натягов. Такой подход в соединениях деталей из ВПКМ ограничен прочностью на смятие композиционных материалов. Передача нагрузки в таких соединениях в значительной степени осуществляется в результате трения по поверхностям контакта, создаваемого за счет сил сжатия пакета заклепками, шпильками и болтами.
5. Время сборки составляет 50–75% цикла изготовления летательного аппарата, а ее трудоемкость 30–40% трудоемкости его изготовления. Показано, что основным способом соединения деталей планера самолета является заклепочное соединение. На долю сверлильно-клепальных работ в среднем приходится 30–45% трудоемкости сборочных работ (по некоторым данным до 60%). В сверлильно-клепальных работах трудоемкость сверления составляет около 30%, зенкерования – 13%, вставки заклепок – 4%, расклепывания заклепок – 53%.
6. Выделяют шесть основных рабочих процессов формирования отверстий в ВПКМ и пакетах ВПКМ/металл: обработка осевым инструментом (сверление, рассверливание, зенкерование, протягивание), спиральное фрезерование, гидроабразивная и лазерная резка, вырубка, электроэрозионная обработка. В реальном сборочном производстве ЛА основными рабочими процессами, обеспечивающими требования качества обработки и чистоты рабочего места, являются только обработка осевым инструментом и спиральное фрезерование.

РАЗДЕЛ 2

# Качество отверстий

Качество отверстий в деталях из ВПКМ, как и в металлических деталях, в значительной степени определяет срок службы всего соединения [12, 22]. Показатели качества отверстий рассматриваются как технологические критерии прочности и надежности будущего соединения. Вместе с тем показатели качества отверстий в деталях из ВПКМ и в металлических деталях различны. Традиционно качество отверстий в металлических деталях для их механических соединений определяется размерной точностью, шероховатостью поверхности, формой отверстия и его позиционным отклонением. В силу неоднородного строения для ВПКМ этих показателей недостаточно для того, чтобы обеспечить надежность соединения. Поэтому для ВПКМ применяются и регламентируются дополнительные, специфические для них, показатели.

## 2.1. Показатели качества отверстий в однородных пакетах ВПКМ

Показатели качества отверстий в деталях из ВПКМ включают в себя наряду с такими показателями, как размерная точность, погрешность формы и взаимного расположения, шероховатость обработанной поверхности, также и показатели поврежденности поверхности обработанного отверстия: ***расслаивание, сколы кромок отверстия, вытягивание волокон*** и др. (рис. 2.1) [37, 38, 39]. Известно [36], что приблизительно 60% брака при сборке летательных аппаратов возникает из-за повреждений поверхностей отверстий.

В деталях из ВПКМ традиционно применяемые параметры шероховатости обработанной поверхности не обеспечивают полной информации о микрорельефе и качестве поверхности отверстий [40]

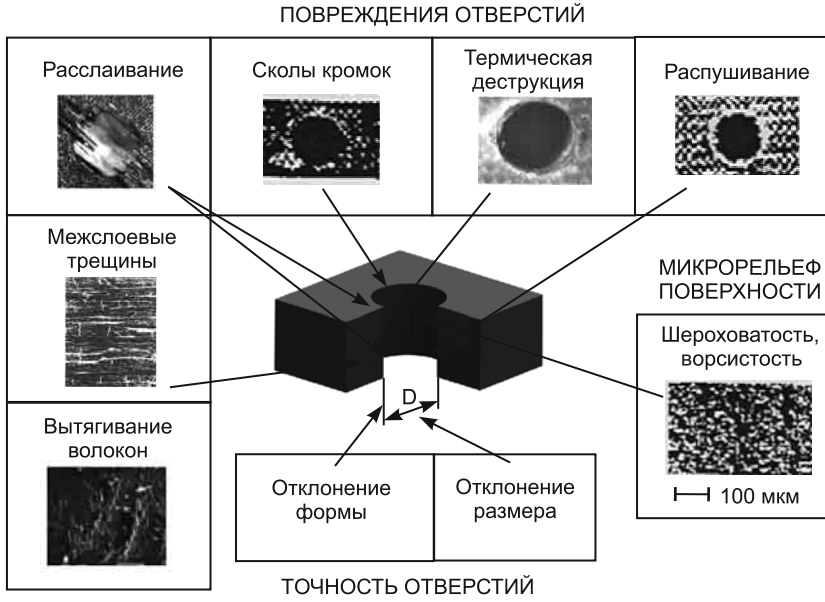



**Рис. 2.1.** Показатели качества отверстий в ВПКМ [38]

вследствие наличия, как правило, так называемой ***ворсистости*** – выступания над поверхностным слоем несрезанных волокон волокнистого наполнителя [181].

Таким образом, в тех случаях, когда имеет место выступание несрезанных волокон над обработанной поверхностью на величину больше 4–5 диаметров элементарного волокна в количестве более 20–30% общего количества волокон, качество поверхности должно дополнительно оцениваться ворсистостью, т.е. количеством несрезанных волокон и величиной их выступания над обработанной поверхностью.

Характерными повреждениями поверхностей отверстий в деталях из ВПКМ являются также ***межслоевые трещины*** и ***термическая деструкция***. Часто из-за недорезания расслоившихся слоев на выходе инструмента из формируемого отверстия не все волокна срезаются. Если несрезанных волокон мало, то они выглядят как *заусенцы*, если их много (больше 20–30%) – наблюдается ***распушивание*** волокон [26, 37, 39, 41, 42] (табл. 2.1).

**Таблица 2.1.** Виды повреждений поверхности отверстий в ВПКМ

| Вид повреждения | Характеристика | Причина возникновения |
|---|---|---|
| Расслаивание наружных слоев у поверхности врезания режущего инструмента (*peel-up delamination*) | Равномерное по образующей расслаивание слоев у поверхности врезания инструмента | Сила резания, действующая со стороны ленточек и перемычки, больше прочности межслоевой связи верхних слоев |
| Расслаивание наружных слоев у поверхности выхода режущего инструмента (*push-down delamination*) | Равномерное по образующей расслаивание слоев у поверхности выхода инструмента | Осевая сила резания, действующая на несрезанные слои ВПКМ, больше прочности межслоевой связи нижних слоев |
| Заусенцы (*Splintering*); распушивание волокон (*fuzzing*) | Часть волокон на выходе инструмента из отверстия остается несрезанной | Несрезание нижних слоев из-за их деформации и отслаивания нижнего слоя |
| Межслоевые трещины (*spalling, interlaminar cracking*) | Формирование трещин между слоями многослойных ВПКМ внутри отверстия | Осевая сила резания, больше прочности межслоевых связей |
| Вытягивание волокон (*fibre pull-out, fibre/matrix debonding)* | Вытягивание волокон из матрицы | Малая адгезия волокон к матрице при данной осевой силе |
| Скол кромки (*edge chipping*) | Микроразрушение кромки отверстия, равномерное по образующей | Повышенная хрупкость ВПКМ, вибрации при резании |
| Термическая деструкция (*Thermal damages*) | Повреждения поверхности отверстия из-за повышенной температуры | Температура резания больше предельной для данного ВПКМ |

Наиболее распространенным видом повреждения отверстий является ***расслаивание***, представляющее собой разделение поверхностных слоев ВПКМ под действием усилий, главным образом осевых, возникающих в процессе резания.

### 2.1.1. Повреждения отверстий

Как уже было отмечено, наиболее характерным видом повреждения отверстий в деталях из ВПКМ является расслаивание. Этот вид повреждения обусловлен тем, что ось отверстия, как правило, располагается перпендикулярно плоскости армирования, и действующие силы

резания стремятся оторвать один слой от другого. Несмотря на различные механизмы возникновения расслаиваний, в конечном счете они приводят к нарушению целостности структуры ВПКМ.

В зависимости от причины возникновения этого дефекта (табл. 2.1) [41] может наблюдаться ***расслаивание наружных слоев у поверхности врезания режущего инструмента*** (рис. 2.2, 2.3) и ***расслаивание наружных слоев у поверхности выхода режущего инструмента*** (рис. 2.4). Этот вид повреждения отличается от межслоевой трещины тем, что фор-

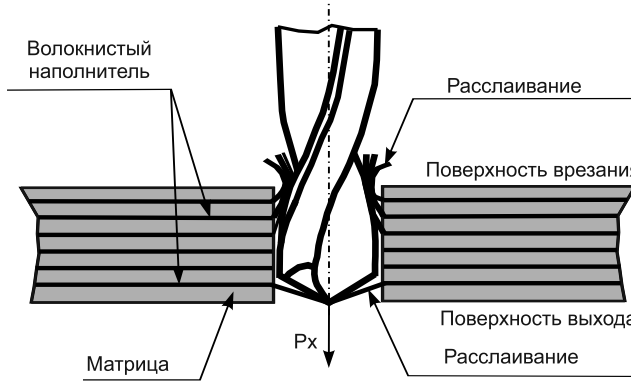



**Рис. 2.2.** Принципиальная схема повреждения отверстия путем расслаивания наружных слоев листа ВПКМ [52]

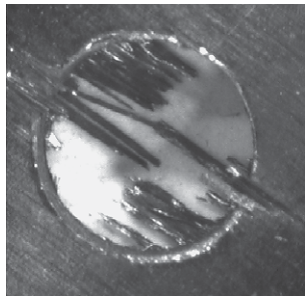


**Рис. 2.3.** Пример расслаивания наружных слоев листа ВПКМ у поверхности врезания сверла

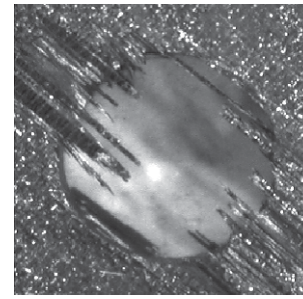


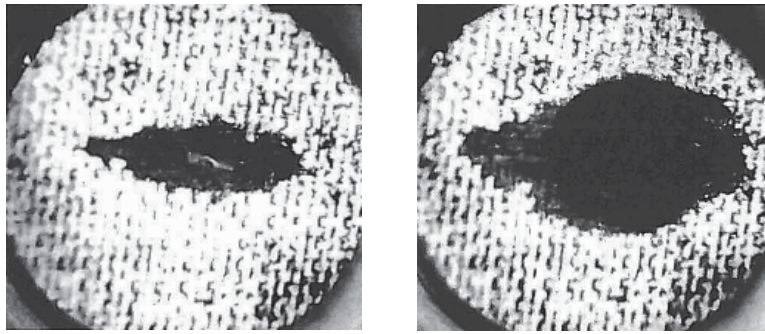
**Рис. 2.4.** Пример расслаивания наружных слоев листа ВПКМ у поверхности выхода сверла

мируется исключительно в поверхностных слоях ВПКМ [37]. К основным причинам расслаивания даже при обработке «острым» инструментом (сверлом) можно отнести: при ***расслаивании наружных слоев у поверхности врезания*** – наличие перемычки у инструмента (сверла) и отрицательных передних углов в этой зоне, а также большая подача; при ***расслаивании наружных слоев у поверхности выхода режущего инструмента***, как правило, большая подача.

Дополнительно ***расслаивание наружных слоев у поверхности врезания режущего инструмента*** возникает вследствие действия сил, прижимающих верхние слои ВПКМ к рабочим поверхностям сверла (рис. 2.2, 2.3). Часть срезанного материала, т.е. формируемая стружка, начинает «наматываться» («закручиваться») в стружкоотводящих (стружечных) канавках сверла и уплотняться еще до того, как он будет полностью отделен от соответствующего слоя ВПКМ, в результате чего в зоне его контакта с вновь сформированной (обработанной) поверхностью возникают относительно большие силы трения, особенно при больших подачах. Эти силы приводят к тому, что перемещающаяся вдоль стружечной канавки достаточно сильно уплотненная часть срезанного слоя, воздействуя на верхние слои заготовки, которые в данной зоне удерживаются только силами межслоевых связей, стремится их разделить [41].

Таким образом, склонность к расслаиванию у поверхности врезания определяется свойствами обрабатываемого и инструментального материалов, режимом резания, конструкцией инструмента и величинами действующих сил резания, в первую очередь осевых.

***Расслаивание наружных слоев у поверхности выхода режущего инструмента*** – повреждение, которое происходит в межслоевых областях нижних слоев ВПКМ при выходе режущего инструмента из контакта со слоистой заготовкой (рис. 2.4). Это повреждение является следствием действия осевой силы резания на еще полностью неразрезанные слои заготовки. При определенных условиях напряжения, возникающие в результате действия осевой силы резания, могут превышать прочность межслоевых связей в еще полностью несрезанных слоях формируемого отверстия. Под действием осевой силы еще несрезанные слои изгибаются, что приводит к нарушению условия прочности между слоями, формированию и распространению трещины в межслоевом пространстве и, естественно, к разрыву адгезионных связей между отдельными слоями и расслаиванию остающихся несрезанных слоев листа ВПКМ (рис. 2.2) [41].



а) б)

**Рис. 2.5.** Расслаивание наружных слоев у поверхности выхода твердосплавного сверла ∅6 после выхода поперечной режущей кромки (*а*) и сверла полностью (*б*): $n$ = 3000 об/мин, $S$ = 91,2 мм/мин. Заготовка – разнонаправленная пластина PMCRLF с ориентацией волокон на поверхности 0° [28]

Эксперименты показали, что расслаивание при сверлении наиболее активно происходит в момент воздействия поперечной режущей кромки на впереди лежащие («нижние») слои (рис. 2.8) и ее выхода из контакта с заготовкой (рис. 2.5).

Экспериментально доказано [12], что при сверлении расслаивание у поверхности врезания (рис. 2.3) намного меньше, чем у поверхности его выхода из отверстия (рис. 2.4).

Расслаивание наружных слоев способствует несрезанию волокнистого наполнителя (рис. 2.3, 2.4) [11, 29], особенно если на поверхности листа ВПКМ присутствует однонаправленный слой. Поэтому связанные с расслаиванием повреждения вдоль образующей отверстия неравномерны. Область повреждения вокруг отверстия имеет частично эллиптическую форму, причем большая ось этого эллипса ориентируется вдоль направления волокон. Несрезанные волокна могут наблюдаться как на поверхности входа сверла в заготовку, так и на поверхности выхода сверла из отверстия. В зависимости от свойств волокон обрабатываемого листа ВПКМ и схемы их укладки повреждения могут иметь вид заусенцев и/или распушенных волокон (рис. 2.6) [44]. Заусенцы представляют собой отдельные несрезанные волокна достаточно правильной формы, а распушивание – относительно большое число несрезанных волокон по периметру отверстия. Распушивание преимущественно возникает в области резания с ост-

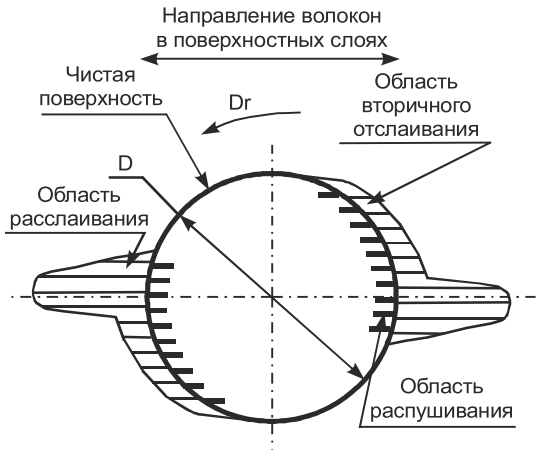



**Рис. 2.6.** Принципиальная схема формирования заусенцев и распушивания волокон на выходе сверла (вид снизу) [28]

рым углом направленности волокон относительно режущей кромки в условиях, когда обработка выполняется инструментом с увеличенным радиусом округления режущей кромки [12, 65].

Для количественной характеристики расслаивания используют два коэффициента:

1) ***коэффициент расслаивания*** $F_d$ [46], представляющий собой отношение максимального диаметра поврежденной области $D_{max}$ к номинальному диаметру отверстия $D$ (рис. 2.7):

$$F_d = D_{\max} / D; \qquad (2.1)$$

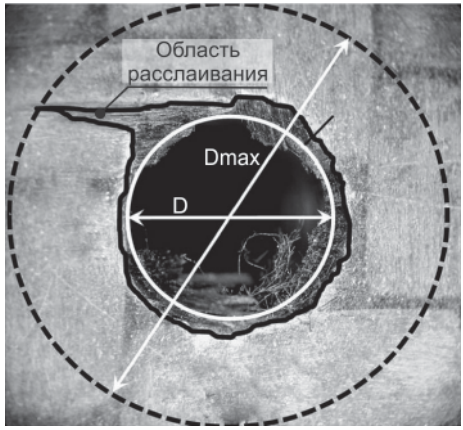



**Рис. 2.7.** К оценке количественных характеристик расслаивания [47]

2) ***коэффициент расслаивания по площади*** $F_A$ [48]. Он определяется как отношение площади поврежденной области ($A_{Dmax}$) к номинальной площади отверстия ($A_D$):

$$F_A = \frac{A_{D_{\max}}}{A_D} = \frac{D^2_{\max}}{D^2} . \qquad (2.2)$$

Коэффициенты расслаивания всегда принимают значения больше 1.

Рассмотрим развитие расслаивания. Сверление отверстий спиральными сверлами можно условно разделить на два этапа [44].

К *первому этапу* расслаивания можно отнести ту часть процесса, которая связана воздействием на нижние слои ВПКМ осевой силы, возникающей на поперечной режущей кромке (рис. 2.8а). Под действием этой силы около оси отверстия образуется малая выпуклость, которая по мере движения сверла увеличивается вдоль направления волокон в плоскости армирования. Когда локальные растягивающие напряжения между срезанным и несрезанным слоями на периферии отверстия начинают превышать межслоевую прочность, в определенной области матрицы возникает трещина, которая может устойчиво распространяться. Увеличение выпуклости сопровождается уменьшением сил сцепления между оставшимися несрезанными слоями за счет увеличения касательных напряжений между ними при их растяжении (удлинении) и, соответственно, уменьшением крутящего момента.

При выходе сверла «открываются» поверхностные щели в нижних слоях, в результате чего поперечная режущая кромка выходит из

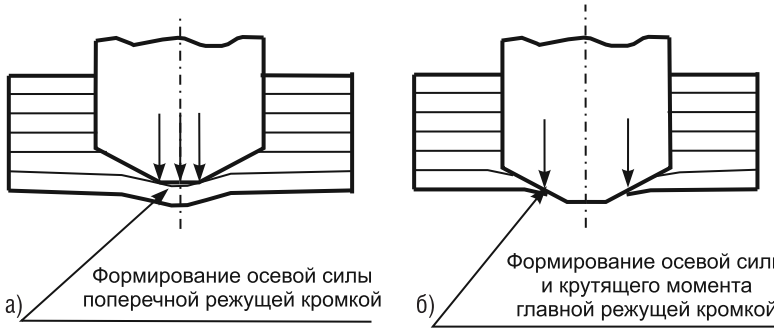



**Рис. 2.8.** Этапы возникновения расслаивания [45]:
а – формирование осевой силы поперечной режущей кромкой; б – формирование осевой силы и крутящего момента главной режущей кромкой

контакта с заготовкой (рис. 2.5), и начинается *второй этап* деформирования волокон, формирования и роста трещин за счет осевых сил резания на главных режущих кромках (рис. 2.8б). Учитывая то, что поперечная режущая кромка имеет большой отрицательный передний угол и формирует при сверлении более 50% осевой силы, расслаивание оставшихся несрезанных слоев на этом этапе хоть и имеет место, но в значительно меньшей степени, чем на первом.

Таким образом, размер (диаметр) поврежденной области в поперечном сечении определяется величиной осевой силы $P_x$, создаваемой режущим инструментом на соответствующем этапе при заданных режимах резания, а также свойствами обрабатываемого ВПКМ. Расслаивание возникает тогда, когда осевая сила $P_x$ достигает или становится больше критического значения $[P_x]$:

$$P_x \geq [P_x]. \tag{2.3}$$

С увеличением осевой силы при прочих равных условиях диаметр поврежденной области возрастает (рис. 2.9). При этом, если силы резания в конце первого этапа настолько малы, что повреждения не выходят за границы отверстия, на втором этапе главные режущие кромки срежут эти поврежденные слои и сформируется отверстие без расслаиваний [28]. В противном случае после обработки в отверстии останутся эти повреждения.

Первая аналитическая модель для определения критической осевой силы $[P_x]$ была сформулирована Hocheng и Dharan [49]. Они на основе теории линейной механики разрушения определили выражение для критической осевой силы, которое позволило установить

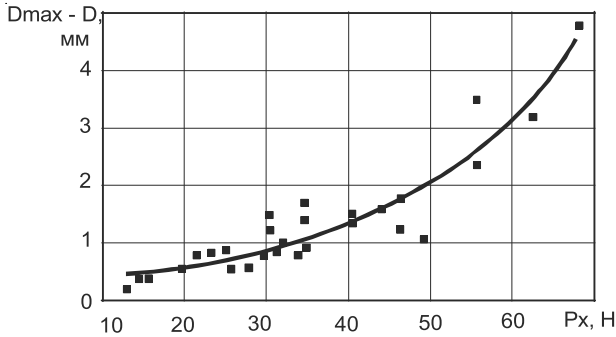



**Рис. 2.9.** Влияние осевой силы на диаметр поврежденной области [44]

соотношение между расслаиванием ВПКМ, режимами сверления и свойствами ВПКМ. Jain и Yang расширили теорию Hocheng и Dharan и учли в своей модели анизотропию ВПКМ [50, 51]. Они разработали модель, связывающую величину подачи с началом расслаивания [50]. Основываясь на подходе механики сплошных сред, Everstine и Rogers, сформулировали модель для прогнозирования максимальной осевой силы для обработки отверстий без расслаиваний в ВПКМ с параллельной направленностью волокнистого наполнителя [52]. Sadat et al. для прогнозирования процесса расслаивания в графитопласте использовали метод конечных элементов [53]. Zhang et al. для прогнозирования критической осевой силы представили обобщенную модель, в которой расслаивание может возникать при различной локализации слоев [44]. Описанные работы рассматривали осевую силу при сверлении как сконцентрированную нагрузку. При этом изучалась работа не только спиральных сверл, но и сверл других конструкций [32, 39, 41, 50, 54, 55, 56, 57].

Несмотря на свою простоту и достаточно грубые допущения (например, изотропия обрабатываемого материала), на практике чаще всего при оценке критической осевой силы находит применение модель расслаивания, предложенная Hocheng – Dharan [49]:

$$[P_x] = \pi \sqrt{\frac{8 G_k E_1 h^3}{3(1 - \nu_{12}{}^2)}}, \qquad (2.4)$$

где $E_1$ – модуль упругости;
$\nu_{12}$ – коэффициент Пуассона;
$G_k$ – межслоевая вязкость разрушения;
$h$ – толщина несрезанного слоя заготовки.

Фактическая критическая осевая сила меньше расчетного по указанной теории значения на 20–40% в связи с анизотропией реальных ВПКМ, и тем меньше, чем больше отношение модулей упругости в главных направлениях [32].

Углепластики в большей степени, чем какие-либо другие ВПКМ, при одной и той же остаточной глубине склонны к расслоению вызванной критической осевой силой, даже несмотря на то что величина $G_k$ для углепластиков ниже (табл. 2.2). Это легко объясняется большей величиной модуля упругости армированных углепластиков [12].

Количество поврежденных слоев может быть определено сравнением фактической осевой силы резания $[P_x]$ с ее критическим значе-

**Таблица 2.2.** Критические значения осевой силы [$P_x$]: углепластик, стеклопластик, гибридный КМ [12]

| Материал | $G_k$ (Дж/м$^2$) | E, ГПа | v12 | [$P_X$], Н |
|---|---|---|---|---|
| Углепластик | 290 | 150 | 0,25 | 391 |
| Стеклопластик | 568 | 25 | 0,18 | 220 |
| Гибридный КМ | 299 | 52,5 | 0,20 | 231 |

нием для заданного количества слоев. При оценке возможности образования этого повреждения для заданных условий обработки можно руководствоваться следующим правилом [58]: если на диаграмме «Сила – Остаточная глубина сверления» на выходе сверла (рис. 2.10) кривая фактической силы проходит ниже кривой критической (предельной) осевой силы в области данного слоя, то расслаивание в нем не произойдет.

Если описанные ранее расслаивания возникают в наружных слоях ВПКМ, то ***межслоевые трещины*** есть только во внутренних слоях отверстий деталей из ВПКМ. Обычно они начинаются под углом 60° к плоскости армирования. Трещина распространяется в этом направлении до достижения межслоевой границы [33].

На стенке отверстия межслоевые трещины возникают за счет накручивания волокон и деструкции смолы [32] (рис. 2.11). Этот вид

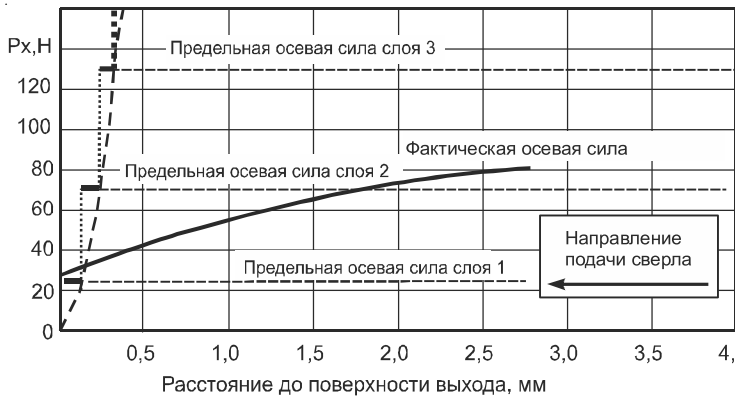



**Рис. 2.10.** Остаточная глубина сверления и осевая сила: подачи 0,1 мм/об, 0,4 мм/об, 0,7 мм/об и 1,0 мм/об; частота вращения шпинделя 1000 об/мин [58]

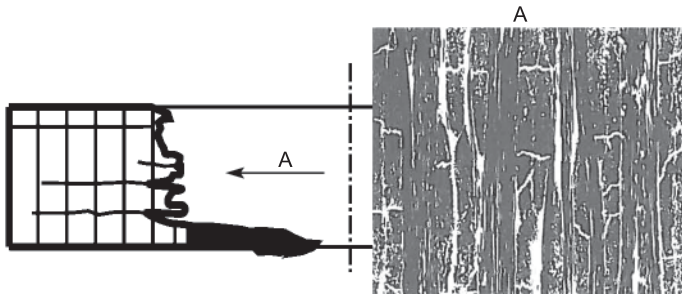



**Рис. 2.11.** Межслоевые трещины, образовавшиеся при резании ВПКМ с углом ориентации волокон 90° [28, 32]

повреждения возникает и тех случаях, когда угол ориентации волокнистого наполнителя θ близок к 90°[28].

Выделение теплоты в результате трения волокнистого наполнителя по инструменту и высокая температура резания (раздел 3) может привести к ***термической деструкции*** вдоль стенок отверстия, которая вызывает стеклование матрицы реактопластов и оплавление матрицы термопластов [63]. Высокая температура может также повредить волокнистый наполнитель путем горения углеродных волокон (рис. 2.12) [28]. Высокая температура также приводит к налипанию стружки на рабочих поверхностях инструмента [64], что, в свою очередь, еще больше повышает температуру в зоне резания и усугубляет термическую деструкцию.

Следует дополнительно отметить, что при сверлении ВПКМ склонны к оплавлению и обгоранию поверхности вокруг отверстия

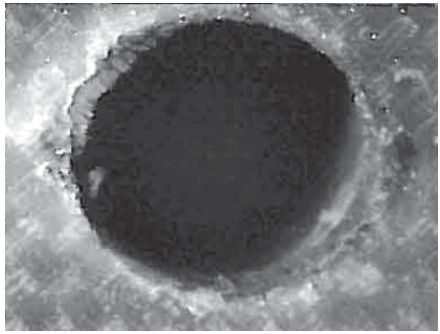


**Рис. 2.12.** Термическая деструкция эпоксидной смолы при сверлении стеклопластика с помощью твердосплавного сверла без СОТС: $V$ = 300 м/мин [28]

[59, 60, 61]. Отверстия могут иметь поврежденную область вокруг кромок, где ухудшается устойчивость матрицы к термическому или механическому воздействию[62].

Основными причинами термической деструкции отверстий являются чрезмерное тепловыделение и недостаточный отвод тепла, возникающий при резании ВПКМ с неправильно подобранными параметрами инструмента и условиями обработки.

Предельная температура в значительной степени зависит от состава ВПКМ. Например, для углепластиков на основе эпоксидной смолы температура резания не должна превышать 400° [11]. Использование СОТС позволяет уменьшить температуру обработки (см. раздел 3). Однако СОТС при резании ВПКМ может вызвать химическое повреждение отверстий. Химическое повреждение в конечном итоге приводит к отделению волокнистого наполнителя от матрицы с последующим образованием трещин и расслаиванием. Повреждающая активность СОТС зависит от ее типа и основы (водная или масляная основа), pH фактора (кислотный, щелочной или нейтральный), времени контакта с СОТС. При резании ВПКМ с СОТС может иметь место водное насыщение ВПКМ, что, как правило, сопровождается разрушением молекулярных связей между волокнистым наполнителем и матрицей.

### 2.1.2. Точность отверстий

Говоря о точности отверстий в деталях из ВПКМ, рассматривают точность размеров (диаметров) отверстий (размерная точность), точность их формы и точность взаимного расположения.

Размерная точность отверстия в деталях из ВПКМ определяется двумя факторами – упругой деформацией технологической системы под действием сил резания и упругим восстановлением обрабатываемого материала после обработки поверхности. Эти факторы при резании ВПКМ более значимы, чем при обработке большинства металлов.

Большое упругое восстановление обрабатываемого материала и вызванное этим уменьшение диаметра отверстий (усадка) являются характерной особенностью сверления ВПКМ. Из-за малого модуля упругости ВПКМ силы, действующие со стороны инструмента на обработанную поверхность в момент ее формирования, приводят к ее значительной деформации. Вследствие последующего упругого восстановления возникает остаточная деформация поверхности

отверстия, и его диаметр, как правило, отличается от диаметра сверла (требуемого по чертежу или предполагаемого размера), что необходимо обязательно учитывать при назначении условий обработки и прогнозировании ее выходных параметров. На величину остаточной деформации влияют инструментальный материал, геометрия инструмента, величина его износа (размерного), режим резания, свойства обрабатываемого ВПКМ, состав армированных волокон в нем и др.

Отверстия, изготовленные твердосплавными сверлами, как правило, имеют диаметр больше диаметра сверла, а быстрорежущими сверлами – меньше диаметра сверла [43]. В зависимости от марки ВПКМ уменьшение диаметра отверстия может достигать 0,06 мм (табл. 2.3). При сверлении ступенчатыми сверлами за счет уменьшения остаточной деформации обработанной поверхности после резания второй ступенью можно получить (при прочих равных условиях) меньшую остаточную деформацию отверстия, чем при сверлении с помощью стандартных спиральных сверл [27]. Уменьшение радиуса округления режущих кромок сверл также уменьшает остаточную деформацию отверстия [28].

При сверлении быстрорежущими сверлами на диаметр отверстия наибольшее влияние оказывает скорость резания, в то время как при сверлении твердосплавными – подача (рис. 2.13). Диаметр отверстия увеличивается с увеличением скорости резания и подачи, особенно при сверлении твердосплавными сверлами. Увеличением диаметра отверстия при интенсивных режимах резания связано, как правило, с увеличением вибраций [43].

На точность отверстий также существенное влияние оказывает износ инструмента. Диаметр изготавливаемого отверстия будет тем меньше, чем больше размерный износ инструмента независимо от

**Таблица 2.3.** Уменьшение диаметра отверстий после сверления сверлами диаметром 3–8 мм [16]

| Обрабатываемый материал | Значение «усадки», мм |
|---|---|
| Стеклотекстолит СТЭФ | 0,005–0,02 |
| Стекловолокнит АГ-4С | 0,01–0,03 |
| СВАМ | 0,02–0,04 |
| Стеклотекстолит ВФТ-2ст | 0,01–0,06 |
| Стеклотекстолит КАСТ-В | 0,01–0,05 |
| Углепластик КМУ-1у | 0,01–0,025 |

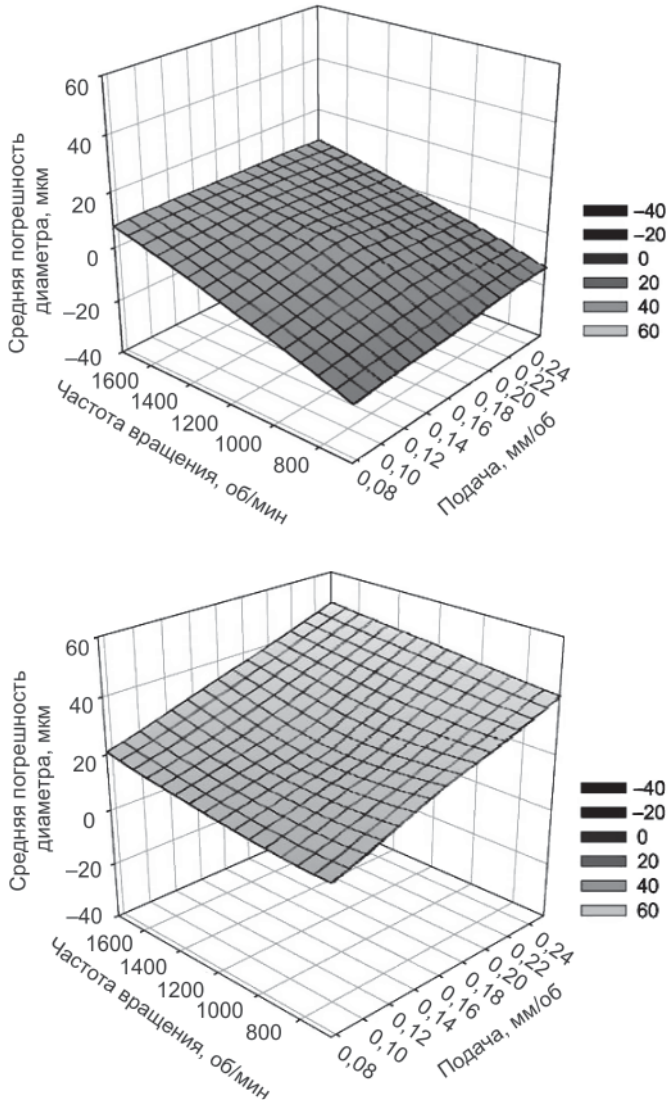



**Рис. 2.13.** Влияние скорости резания и подачи на среднее отклонение диаметра отверстия в Gr/Bi (графитопласт) [43] при обработке спиральными сверлами: быстрорежущим (а) и твердосплавным (б). Номинальный диаметр сверла – 6,35 мм

инструментального материала сверл. Наибольшее влияние на точность отверстия оказывает износ вершин лезвий в месте сопряжения с ленточкой, сопровождающийся уменьшением диаметра сверла и, следовательно, диаметра отверстия [26, 28].

Биение шпинделя и биение главных режущих кромок сверла чаще всего приводит к увеличению диаметра отверстия. Размер отверстия при сверлении твердосплавными сверлами очень чувствителен также и к биению поперечной режущей кромки (рис. 2.14).

Остаточная деформация отверстия в значительной степени зависит от состава и свойств композиционного материала. Сверление некоторых ВПКМ возможно и без остаточной деформации. Например, A. Velayudhaam экспериментально доказал [28], что при сверлении твердосплавным сверлом тканевого стеклопластика с высоким содержанием волокон заметная остаточная деформация не возникает, так как тканевая основа препятствует изгибу волокон и уменьшает упругое восстановление обработанной поверхности.

При формировании отверстий в ВПКМ осевым инструментом форма отверстий искажается как в поперечном (отклонение от круглости), так и в продольном (отклонение от цилиндричности) сечении.

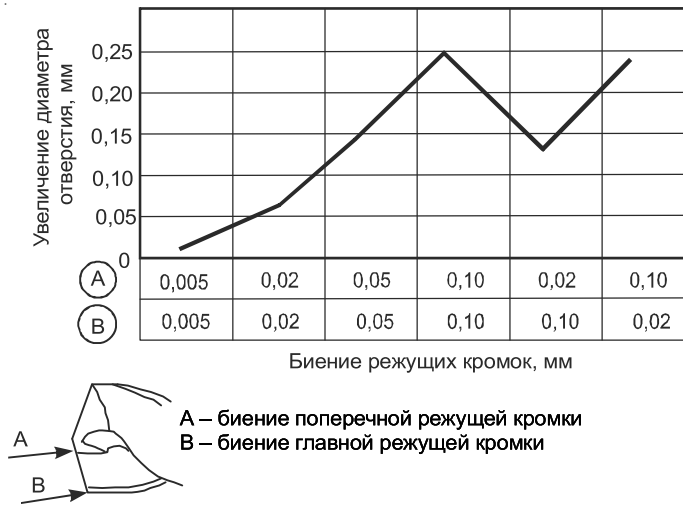



**Рис. 2.14.** Влияние биения главных режущих кромок и поперечной режущей кромки на размер отверстия [66]

Такая погрешность формы иногда может превосходить допуск размеров отверстия.

Отклонение от круглости возникает в результате неравномерного упругого восстановления обрабатываемого материала вдоль образующей отверстия, что, как правило, вызвано анизотропией свойств ВПКМ [64]. Действительно, во время сверления ориентация режущей кромки инструмента относительно волокон постоянно изменяется (рис. 2.15). Угол между направлением волокна и режущей кромкой последовательно увеличивается от 0° до 360°. Волокна сначала сжимаются, затем изгибаются и далее растягиваются. За один оборот инструмента цикл повторяется два раза. Упругое восстановление волокон, подверженных изгибу, меньше, чем волокон, подверженных растяжению-сжатию. Поэтому отверстие приобретает форму эллипса. Описанный механизм проявляется при обработке отверстий не только в однонаправленных, но и при обработке разнонаправленных ВПКМ, хотя основная ось эллипса может иметь различную ориентацию в зависимости от толщины однонаправленных слоев в листе [12, 69]. Увод оси сверла под действием неравномерных на режущих кромках радиальных сил резания дополнительно способствует формированию отклонения от цилиндричности отверстий.

Погрешность формы и взаимного расположения зависит от обрабатываемого материала, режима резания, материала и геометрии режущего инструмента, а также его износа.

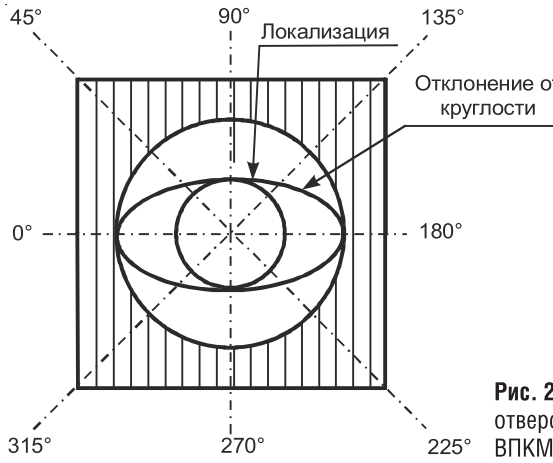
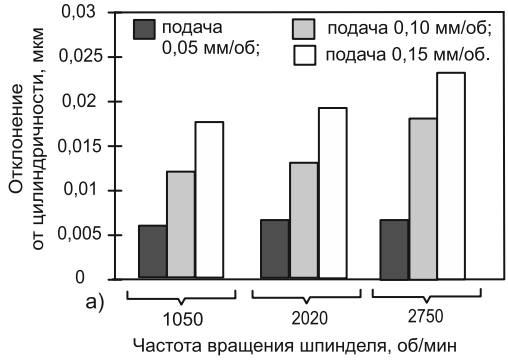



**Рис. 2.15.** Характерная форма отверстия в однонаправленном ВПКМ [64]

Сверла из быстрорежущей стали формируют отверстия с большим отклонением от круглости, чем твердосплавные сверла [43]. Например, отклонение от круглости при использовании сверла из быстрорежущей стали после сверления 1000 отверстий может достигать 100 мкм, тогда как максимальная величина отклонения от круглости после сверления 24 000 отверстий твердосплавным инструментом без покрытия в тех же условиях не превышает 70 мкм [26].

На форму отверстий превалирующее влияние оказывает режим резания [28, 36, 43]. Однако влияние скорости резания и подачи не однозначно. В одних условиях с увеличением скорости резания и подачи погрешности формы увеличиваются, в других – могут уменьшаться (рис. 2.15, 2.16). Снижение погрешности формы отверстия с увеличением скорости резания наблюдается только для сверл достаточно большого диаметра при малых подачах. Снижение погрешности формы отверстия с увеличением подачи возникает при средних скоростях резания. Для твердосплавных сверл существует некоторая область режимов резания, в которой погрешность формы минимальна (рис. 2.16).



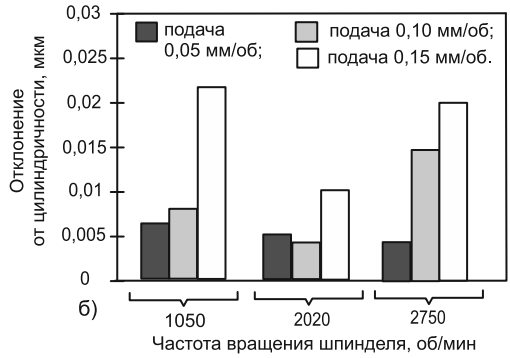




**Рис. 2.16.** Влияние режима резания на отклонение от цилиндричности отверстий в слое углепластика при сверлении пакета углепластик/алюминиевый сплав сверлами диаметром 4 мм (а) и 8 мм (б) [36]

## 2.1.3. Микрорельеф поверхности

Микрорельеф поверхности отверстий в ВПКМ традиционно оценивается стандартными параметрами шероховатости Ra, Rz и др. Вместе с тем эти показатели корректны, когда ***ворсистость*** поверхности имеет приемлемый для регистрации микрорельефа уровень (см. начало раздела 2.1) [28, 181]. Следует также учитывать, что измерения параметров шероховатости Ra и Rz в соответствии с действующими стандартами выполняется на достаточно малой базовой длине, и это не позволяет оценить состояние поверхности в различных слоях листового ВПКМ. Поэтому параметры шероховатости Ra и Rz являются информативными показателями качества поверхностей отверстий в деталях из ВПКМ только в ограниченных случаях [12, 28, 70, 181].

Микрорельеф поверхности при обработке отверстий в ВПКМ в значительной степени зависит от ориентации режущей кромки инструмента относительно волокон и угла ориентации волокон θ в главной секущей плоскости (см. раздел 3). Более низкая шероховатость получается при резании с $\theta \to 0°$, поскольку волокна в этом случае срезаются целиком. Изменение шероховатости при изменении положения режущей кромки связано с изменением режима нагружения волокон при вращении инструмента из-за последовательного чередования процессов сжатия, среза, изгиба и вытягивания волокон (рис. 2.17), описанного в разделе 2.1.2. Максимальные значения

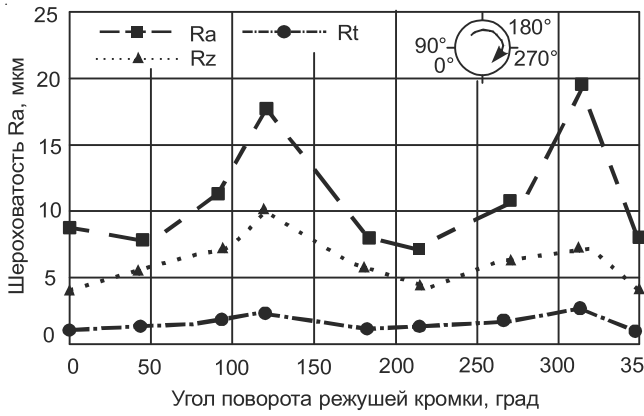



**Рис. 2.17.** Влияние угла поворота сверла на шероховатость поверхности при сверлении ВПКМ [71]

шероховатости получаются при угле между направлением волокна относительно режущей кромки по одним данным составляет 135° и 315° [73], по другим – 30° [28], или даже меньшее значение [43]. Шероховатость поверхности во многом зависит от обрабатываемого материала, конструкции сверла и режима резания (рис. 2.18). Исследования показывают, что при сверлении углепластика даже с малыми подачами ($s$ = 0,05 мм/об) шероховатость поверхности находится в пределах Ra = 1,2–5,8 мкм [36, 72], что значительно больше, чем при обработке заготовок из металлов. Например, шероховатость поверхности отверстий в пластинах из титанового сплава при прочих равных условиях находится в пределах Ra = 0,48–2 мкм [43]. У отверстий, просверленных в углепластиках быстрорежущими спиральными сверлами с нормальной заточкой, шероховатость больше, чем у отверстий, просверленных теми же сверлами в стеклопластиках и гибридных КМ. Применение спиральных сверл с острием [12] понижает шероховатость отверстий в углепластиках, но повышает в стеклопластиках (см. раздел 6).

Из всех элементов режима резания подача является главным фактором, влияющим на микрорельеф обработанной поверхности ВПКМ, поскольку большая часть микронеровностей поверхности обусловливается геометрической составляющей [12, 28, 43]. Шероховатость по-

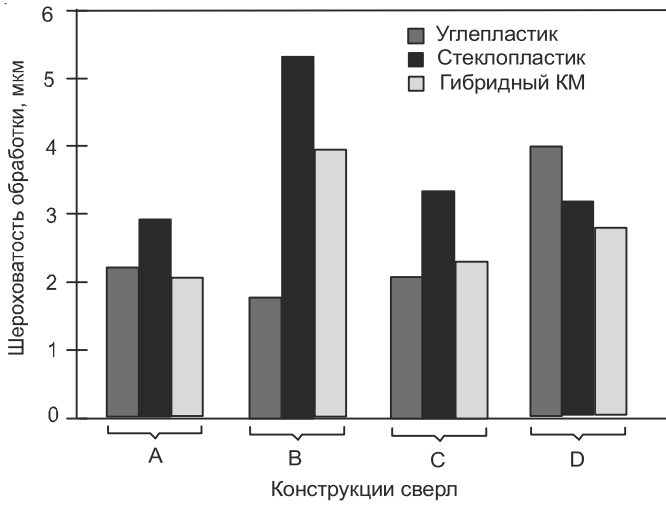



**Рис. 2.18.** Влияние конструкции сверла на шероховатость поверхности при обработке различных ВПКМ [12]

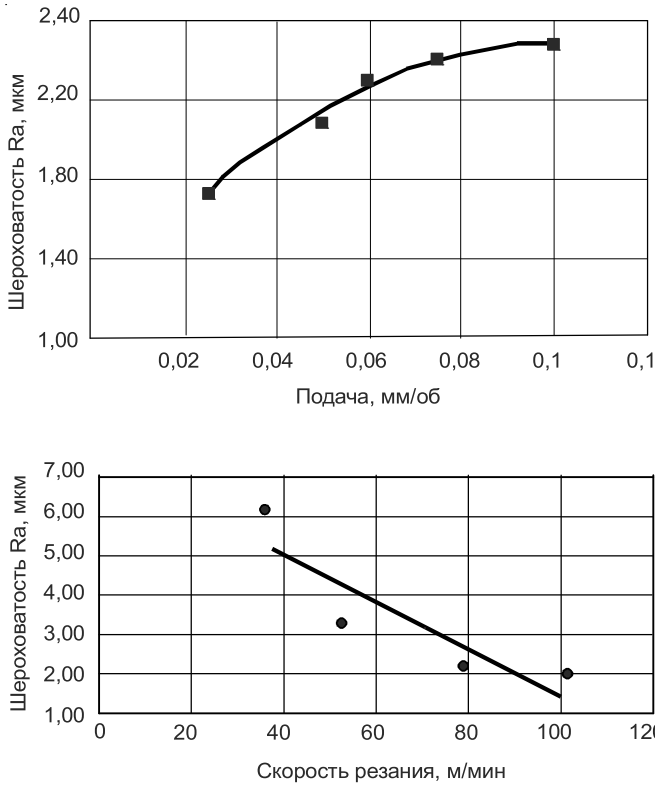



**Рис. 2.19.** Влияние подачи (а) и скорости резания (б) на шероховатость при сверлении углепластика [12]

верхностей отверстий в деталях из ВПКМ увеличивается с увеличением подачи (рис. 2.19а) и уменьшается с увеличением скорости резания (рис. 2.19б). С другой стороны, из-за низкой удельной теплопроводности ВПКМ шероховатость поверхности может увеличиваться с увеличением скорости резания и уменьшением подачи, так как повышается температура [12, 72]. Предельное значение скорости резания из этих соображений для углепластиков составляет около 80–85 м/мин [12]. Надо также принимать во внимание то, что увеличение скорости резания и подачи способствует увеличению амплитуды вибраций и, следовательно, увеличению шероховатости поверхности [28].

Объемная доля волокон также влияет на шероховатость обработанной поверхности. Увеличение объемного содержания волокон вызывает повышение жесткости ВПКМ, удельной теплопроводности и температуры стеклования. В связи с этим объемная доля волокон изменяет характер влияния подачи на микрорельеф обработанной поверхности: при сверлении ВПКМ с низкой объемной долей волокон шероховатость возрастает с уменьшением подачи и, наоборот, при сверлении ВПКМ с высокой объемной долей волокон – с увеличением подачи [28].

Охлаждение также оказывает влияние на микрорельеф поверхности. Существенно более низкие значения шероховатости можно по-

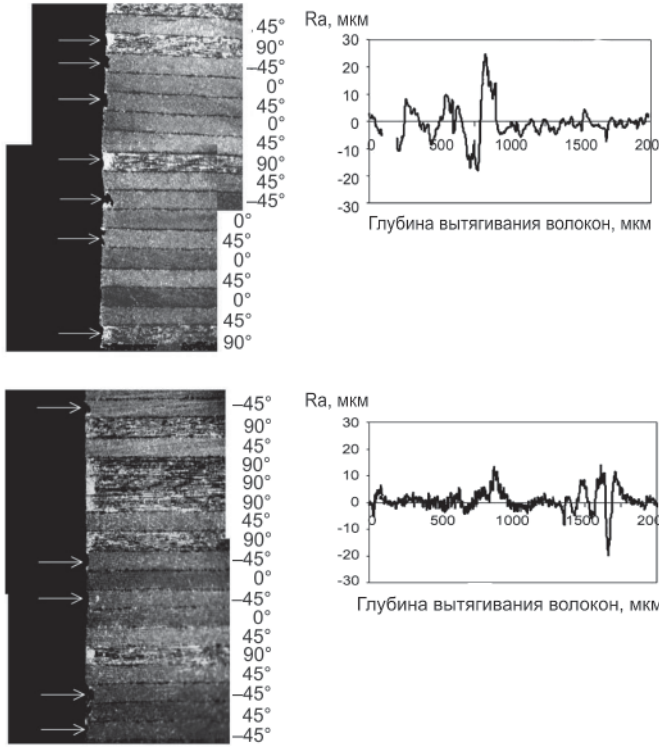
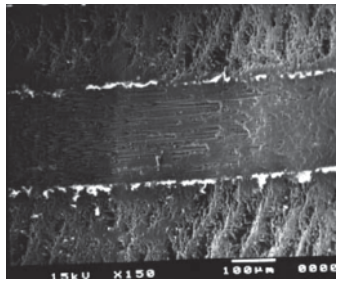


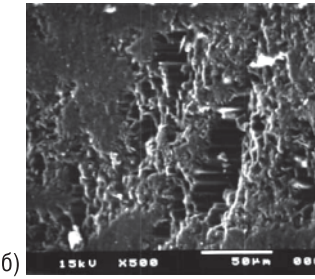

**Рис. 2.20.** Микрорельеф отверстия в Gr/Bi, сформированного сверлами диаметром 6,35 мм из быстрорежущей стали (а) и твердого сплава (б) при подаче 0,25 мм/об и частоте вращения 660 об/мин (стрелки указывают места вытягивания волокон) [43]

лучить при криогенном охлаждении независимо от геометрии сверла, так как низкая температура значительно увеличивает жесткость матрицы и уменьшает внутренние напряжения в поверхности, вызванные разностью между коэффициентами теплового расширения матрицы и армирующего волокнистого наполнителя [28].

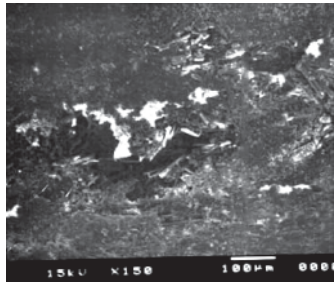
При резании ВПКМ отмечена их склонность к ***вытягиванию волокон***, что в конечном итоге приводит к увеличению глубины резания [11, 43, 72]. Это явление зафиксировано и на микрорельефе поверхности в виде вырывов (сколов) в отдельных слоях, особенно при резании многослойных ВПКМ (рис. 2.20). Более глубокие области вытягивания волокон наблюдаются в слоях с углом ориентации волокон 45° и 90° в отверстиях, обработанных сверлами из быстрорежущей



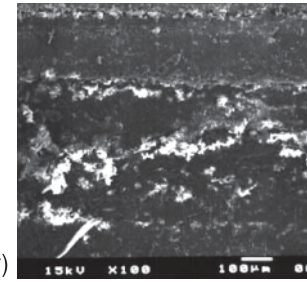

а) Направление волокон 135°; 0°; 135°




б) Направление волокон 135°




в) Направление волокон 90°; 135°; 0°




г) Направление волокон 0°; 45°; 90°; 135°; 90°

**Рис. 2.21.** Фотографии обработанной поверхности Gr/Bi: а, б – твердосплавным сверлом ($S$ = 0,03 мм/об; $n$ = 660 об/мин); в – твердосплавным сверлом ($S$ = 0,25 мм/об; $n$ = 660 об/мин); г – быстрорежущим сверлом ($S$ = 0,08 мм/об; $n$ = 2720 об/мин) [43]

стали, поскольку крутящий момент при сверлении сверлами из быстрорежущей стали на 40% больше, чем при резании твердосплавными сверлами. В отверстиях, выполненных твердосплавными сверлами, в слоях с ориентацией волокон 45° вытягивание волокон отсутствует. Глубина вытягивания волокон зависит также от подачи. При сверлении с большими подачами высота микрорельефа увеличивается, поскольку режущие кромки вместо того, чтобы срезать волокна, их вытягивают, вызывая повышение ***ворсистости*** поверхности (рис. 2.21).

## 2.2. Качество отверстий в смешанных пакетах

Обработка отверстий в смешанных пакетах более сложная, чем однородных пакетов из ВПКМ. Ухудшают качество поверхности отверстий в смешанных пакетах движение горячей металлической стружки по отверстию, повышенная температура металлических слоев при их обработке, нарост на режущих кромках, повышенный износ инструмента, расслаивание волокон и их распушивание между слоями пакета, а также образование в металлических слоях заусенцев на выходе и между слоями [27, 43]. Различное упругое восстановление обрабатываемых материалов пакета усложняет формирование точных отверстий (рис. 2.22).

Воздействие металлической стружки (алюминиевой или титановой) на поверхность формируемого в ВПКМ отверстия [11, 36] возникает при ее движении по стружечным канавкам сверла. Горячая стружка в виде непрерывной ленты при контакте с обработанной поверхностью может повреждать волокна и матрицу, вызывая увеличение размера и ее повреждение, а, следовательно, и увеличение ее шероховатости (рис. 2.23). Увеличение подачи при сверлении металлического слоя приводит к увеличению повреждений поверхности в слое ВПКМ. Такие повреждения в слое углепластика в результате воздействия титановой стружки показаны на рис. 2.24. Глубина повреждений в этом случае приблизительно равна 300 мкм [27].

При сверлении пакетов ВПКМ/металл может наблюдаться явление обратного подрезания [4]. Это эффект заключается в том, что металлическая стружка (алюминиевая или титановая), перемещаясь по стружечным канавкам сверла, оказывает абразивное воздействие на обработанную металлическую поверхность отверстия и матрицу ВПКМ, провоцируя повреждения отверстия и увеличение его размера (рис. 2.25).

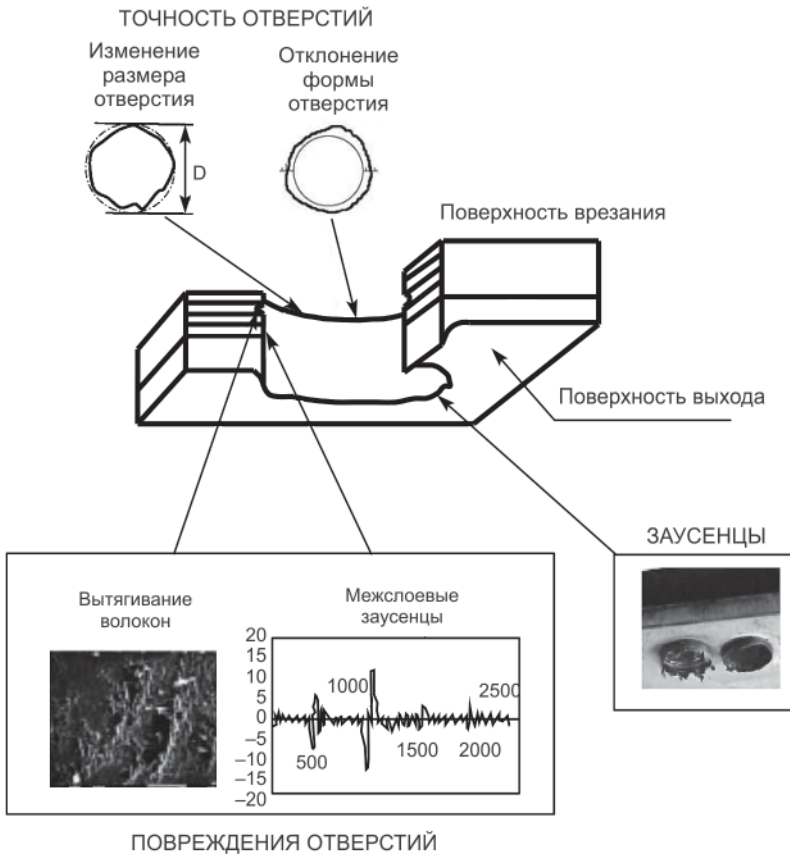



**Рис. 2.22.** Качество поверхности при обработке смешанных пакетов [43]

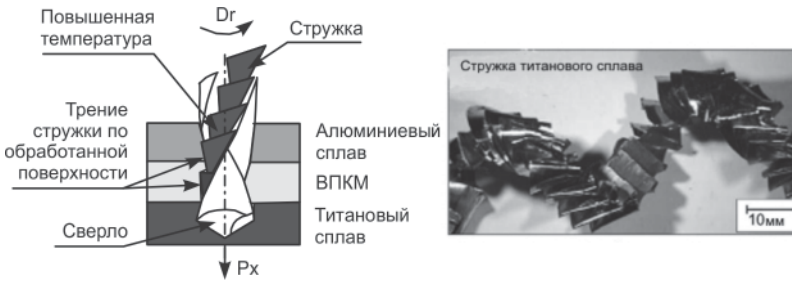



**Рис. 2.23.** Проблемы при удалении стружки при сверлении смешанного пакета Д16/ВПКМ/ВТ6с [27]

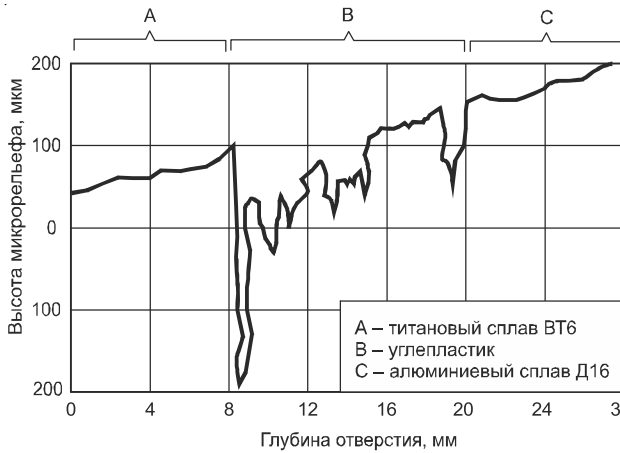



**Рис. 2.24.** Профиль микрорельефа поверхности отверстия, обработанного спиральным твердосплавным трехперым сверлом ∅16 мм [27]

Вредное воздействие металлической стружки, ухудшающее качество поверхности формируемого в ВПКМ отверстия, может быть уменьшено за счет:

1) устранения всех зазоров в технологической системе с целью повышения жесткости и уменьшения вероятности возникновения вибраций;
2) использования рациональной геометрии сверла, обеспечивающей надежное дробление стружки;
3) выбора оптимальной скорости резания и подачи;
4) обеспечения надежности закрепления пакета;

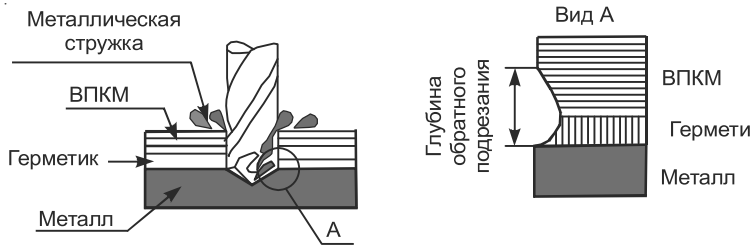
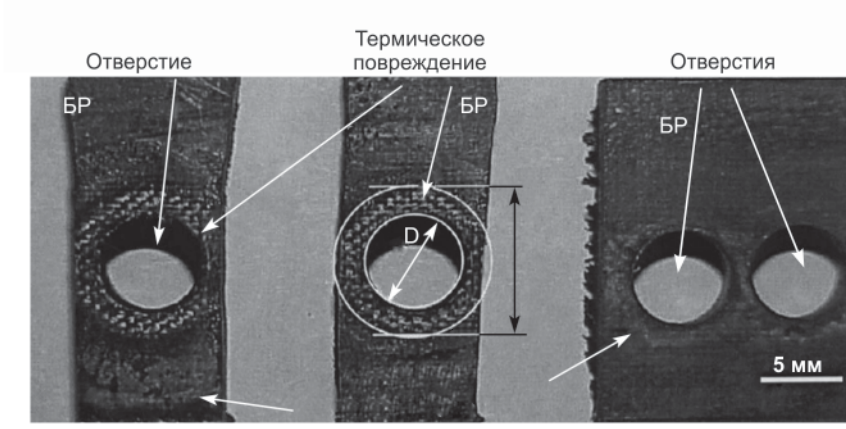



**Рис. 2.25.** Формирование обратного подрезания [4]

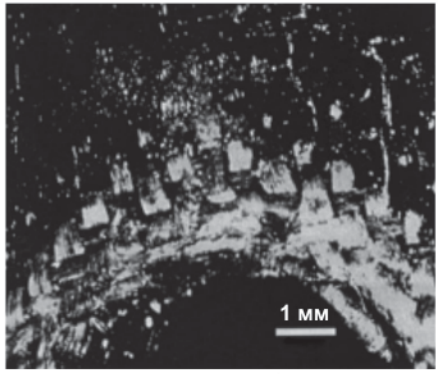
5) применения операции развертывания отверстия после сверления;
6) периодического вывода сверла из отверстия, обеспечивая удаление стружки без ее пакетирования.

Термическое воздействие на слои ВПКМ со стороны металлических слоев в большей степени проявляется при сверлении быстрорежущими сверлами. Оно проявляется в виде колец термических и механических повреждений вокруг отверстия на входе и выходе сверла в сои из ВПКМ (рис. 2.26а), а также в виде вытягивания волокон из-за

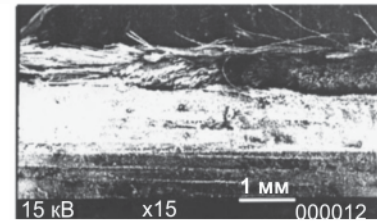



а)

Поверхность, на которой видны цвета побежалости




б)




в)

**Рис. 2.26.** Область повреждений Gr-Bi на поверхности раздела Gr-Bi и Ti после сверления сверлами из быстрорежущей стали и твердого сплава: $s$ = 0,08 мм/об и $n$ = 1750 об/мин (а); $s$ = 0,08 мм/об и $n$ = 2720 об/мин (б) и (в) [72]

перегревания матрицы ВПКМ (рис. 2.26б) в результате локального увеличения температуры резания при обработке отверстия в металлическом слое. Кроме того, в последнем на выходе слое из ВПКМ может наблюдаться расслаивание (рис. 2.26в). Диаметр колец повреждения увеличивается с возрастанием скорости резания и износа сверл, но уменьшается с увеличением подачи. Увеличение подачи хоть и увеличивает количество теплоты, выделяющейся в процессе резания как ВПКМ, так и металлического слоя, но при этом уменьшает время контакта между инструментом и заготовкой. Влияние второго фактора в большинстве случаев оказывается более сильным, чем первого, что сопровождается уменьшением температуры в системе, а, следовательно, и уменьшением повреждаемости изготавливаемого отверстия. Использование твердосплавного инструмента уменьшает термические повреждения в слое из ВПКМ по сравнению с применением инструмента из быстрорежущей стали [72].

Формирование точных отверстий в смешанных пакетах сопряжено со значительными трудностями из-за различного модуля упругости материалов пакета. Такие свойства обусловливают различные величины упругого восстановления обработанной поверхности и, следовательно, различные отклонениям размера вдоль всего отверстия. Например, при сверлении спиральным сверлом с нормальной заточкой из-за малого модуля упругости ВПКМ диаметр отверстия в слое ВПКМ значительно меньше по сравнению с диаметрами отверстия в металлическом слое (рис. 2.27).

Диаметром отверстий в слоях смешанных пакетов можно управлять путем применения сверл специальных конструкций, покрытий, охлаждения и т.п. Так, при сверлении отверстий в пакетах «углепластик – алюминиевый сплав» применение покрытия $TiB_2$ и минимального охлаждения позволяет уменьшить отклонение диаметра отверстий в различных слоях смешанного пакета до 20 мкм (рис. 2.27).

В целом, применение сверл специальной конструкции, оптимальных режимов резания и инструментальных материалов, а также жесткой технологической системы позволяет в 2–3 раза повысить размерную точность отверстий и обеспечить формирование отверстий с точностью вплоть до 8 квалитета путем сверления без последующих чистовых операций. Например, в ходе сверления 100 отверстий диаметром 8 мм сверлом модели Precorp 86 PT с помощью машины Quackenbush 15QDA в смешанном пакете рассеивание диаметра отверстий не превышало 30 мкм, в том числе и по всей (суммарной) толщине пакета, состоявшего в данном случае из листа углепластика тол-

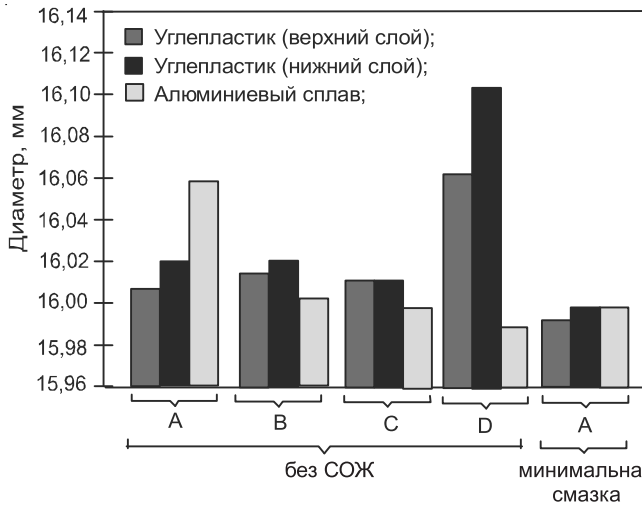



**Рис. 2.27.** Влияние покрытия и метода охлаждения на диаметр отверстия при сверлении смешанных пакетов «углепластик – алюминиевый сплав» [27]: A – спиральное сверло без покрытия; B – пирамидальное сверло; C – спиральное сверло с покрытием $TiB_2$; D – спиральное сверло с алмазным покрытием

щиной 12,7 мм и листа из титанового сплава толщиной 9,5 мм. Частота вращения сверла составляла $n = 500$ об/мин, подача – $S = 0{,}05$ мм/об. Обработка производилась с использованием техники минимальной смазки [67]. В нежестких технологических системах или при применении ручного инструмента достигнуть столь высокой точности отверстия значительно сложнее и требуется при этом, как правило, нескольких технологических переходов.

Интересно, что при формировании отверстий в смешанных пакетах методом винтового фрезерования (раздел 8.5.3) диаметр отверстий в слоях ВПКМ оказывается больше, чем в слоях металла. Это связано с меньшей деформацией инструмента под действием радиальной проекции силы резания в слоях ВПКМ по сравнению со слоями металла (рис. 2.28).

Шероховатость поверхности в металлических слоях меньше, чем в слоях из ВПКМ, что связано с изотропией металлов [36, 43, 72]. Влияние режима резания на шероховатость поверхности в металлических слоях меньше, чем на шероховатость поверхности в слоях из ВПКМ.

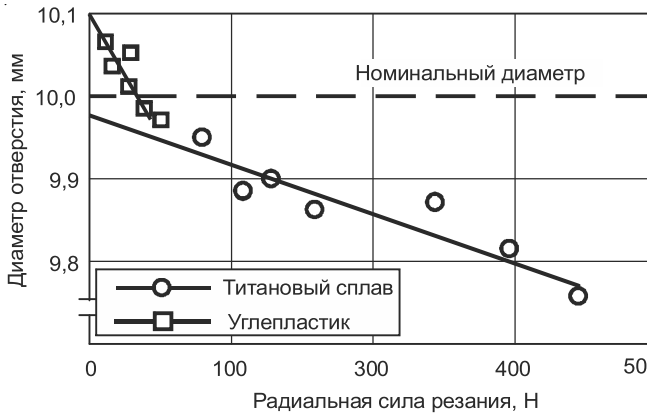



**Рис. 2.28.** Влияние сил, возникающих в процессе винтового фрезерования, на диаметр обрабатываемого отверстия [68]

Если процесс формирования отверстия в смешанном пакете начинать со сверления слоя из ВПКМ, то можно значительно уменьшить расслаивание его наружных слоев у поверхности выхода сверла, используя металлический слой как опорную пластину [36, 72].

При сверлении пакетов «ВПКМ – металл» возможно распушивание волокнистого наполнителя ВПКМ и накопление стружки между его волокнами [10]. Считается, что эти виды повреждений являются неизбежным последствием обработки отверстий в пакетах. Распушивание волокнистого наполнителя и накопление стружки между волокнами и деталями смешанного пакета может привести к некачественной сборке узла и ускоренному износу деталей собираемого соединения [74]. Поэтому детали смешанного пакета после обработки отверстий должны быть обязательно разъединены и очищены от металлической стружки, заусенцев и загрязнений [32].

Заусенец при обработке смешанного пакета формируется в металлическом слое. На выходе сверла из металлического листа, его выходная поверхность нагревается, и пластичность выходного слоя повышается, что способствует более легкому течению обрабатываемого материала и, как следствие, формированию заусенца. В общем, формирование заусенца зависит от осевой силы, температуры резания и температуры, вызванной трением стружки и ленточек (вспомогательных режущих кромок) сверла при сверлении с высокой

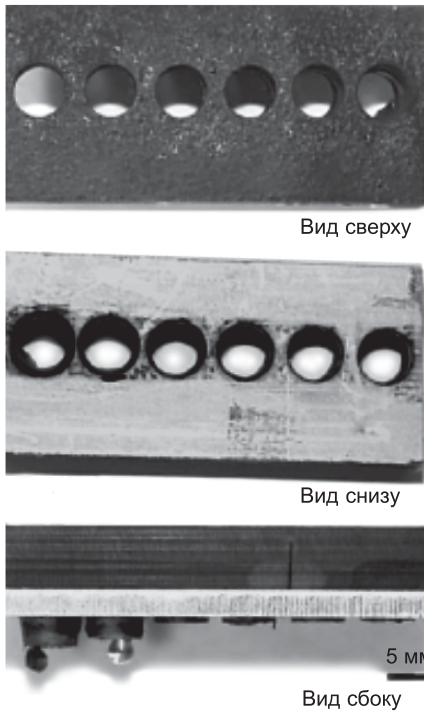



**Рис. 2.29.** Увеличение размера заусенца по мере износа сверла из быстрорежущей стали при сверлении смешанного пакета Gr-Bi/Ti с подачей $S$ = 0,13 мм/об и частотой вращения $n$ = 660 об/мин [72]

скоростью и/или малой подачей, износа режущих кромок и радиуса их округления (рис. 2.29) [72, 75]. Описанные изменения геометрии инструмента увеличивают осевую силу. При работе изношенным сверлом на выходе сверла из металлического листа режущие кромки не режут, а «давят» на материал, создавая при этом заусенец практически по всему периметру отверстия.

Об этом свидетельствуют и большие высоты заусенцев, особенно при высоких скоростях резания и малых подачах при повышенном и быстром износе сверл из быстрорежущей стали [72, 76].

Размер заусенца зависит также и от режимов резания. Скорость резания и подача оказывают значительное влияние на высоту заусенцев на выходе сверла из заготовки. Высота заусенцев на выходе возрастает с увеличением скорости резания и уменьшением подачи [72, 75]. При большой скорости резания заусенец приобретает неровные края [77].

При сверлении отверстий в смешанных пакетах быстрорежущими сверлами размеры заусенца увеличиваются с каждым последующим просверленным отверстием со скоростью 0,1–0,2 мм/отв. [72]. Высота заусенца уже на первом отверстии может составлять 0,9 мм. При обработке твердосплавными сверлами износ незначителен, и, следовательно, высота заусенца намного меньше. При сверлении смешанных пакетов твердосплавными сверлами формируются входные заусенцы, высота которых практически не изменяется с увеличением количества посверленных отверстий (рис. 2.30) [67].

**Рис. 2.30.** Изменение высоты заусенцев при сверлении отверстий в пакете «углепластик – титановый сплав» с помощью сверла Precorp 86 PT [67]

Если обработка отверстия в смешанном пакете начинается с металлического слоя, то на поверхности раздела слоев «металл – ВПКМ» остается «выступающий» материал, часто из закаленного металла, который называется межслойным заусенцем (рис. 2.31).

Такой заусенец может иметь место при сверлении и пакетов «металл – металл», например, Ti/Al [77]. Процесс образования межслойного заусенца, как правило, сопровождается расслаиванием, короблением и другими повреждениями. При отсутствии соответствующего сжатия слоев под действием осевой силы, действующей со стороны сверла, нижний слой пакета деформируется и образуется зазор между слоями. Зазор обеспечивает пространство для формирования заусенца на поверхности раздела двух соседних слоев пакета [80]. С увеличением силы сжатия слоев высота межслойного заусенца и толщина его корня уменьшаются.

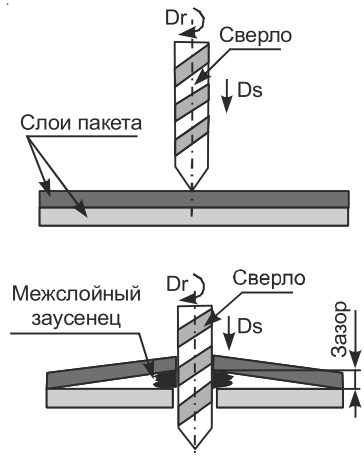



**Рис. 2.31.** Формирование межслойного заусенца в смешанном пакете [79]

Результаты наблюдений показывают, что рациональный порядок расположения слоев при сборке пакетов, большая подача и большая сила сжатия слоев позволяют уменьшить межслойный заусенец. Выбор режима резания при сверлении пакетов с целью исключения или уменьшения высоты межслойного заусенца должен быть, в первую очередь, направлен на уменьшение температуры резания.

Высота заусенца промежуточного слоя хоть и зависит от износа сверла, но все-таки намного меньше, чем от других факторов [78]. Размеры межслойного заусенца промежуточного слоя можно значительно уменьшить за счет применения ступенчатого сверла, обеспечив удаление второй ступенью сверла заусенцев, сформированных первой ступенью.

## 2.3. Общие требования к качеству отверстий

Важнейшим показателем качества отверстий является их ***размерная точность***, которая должна обеспечить необходимый характер посадки в механическом соединении и гарантировать работоспособность соединения в целом. Несмотря на преобладание в соединениях деталей ВПКМ и смешанных пакетов посадок с зазором, диаметральный допуск отверстий в этих соединениях достаточно жесткий, особенно для болтовых соединений. Его величина у различных производителей ЛА различна и определяется видом соединения, количеством отверстий, расстоянием между ними и материалом соединяемых деталей.

Для заклепочных соединений деталей из ВПКМ и смешанных пакетов диаметральный допуск может достигать 250 мкм [26, 27, 28]. По данным справочника [23], заклепочное соединение с большим числом часто расположенных отверстий в ВПКМ и смешанных пакетах (приблизительно каждые 40 мм) требует выполнения отверстий с диаметральным допуском ±25–75 мкм. Одним европейским производителем авиационной техники применяется посадка H10/f7, что для отверстия 8 мм обеспечивает зазор в пределах 13–86 мкм [24]. Исследования соединений ∅3,18 и ∅6,35 мм показали, что только в 4% случаев увеличение зазора от 76 до 279 мкм приводит к 30% уменьшению усталостной прочности соединения [25]. По мнению DiNicola и Fantle DiNicola and Fantle of United Technologies-Sikorsky Aircraft, зазор в 160 мкм является максимально допустимым зазором при изготовлении заклепочных соединений деталей из ВПКМ [24].

Значительно более жесткий допуск необходим для отверстий болтового соединения. Количество болтов, расстояние между ними и зазор в соединении взаимосвязаны и в совокупности оказывают существенное влияние на прочность на смятие в соединениях с несколькими болтами. Исследования показали, что предел прочности на смятие соединения с одним болтом зависит только от диаметра отверстия и не зависит от характера посадки. По данным Y. Amit [30], увеличение зазора уменьшает площадь контакта между болтом и отверстием, увеличивая уровень напряжений в этой зоне (рис. 2.32). На практике допуск диаметра отверстия болтового соединения в узлах крыльев и хвоста самолета с применением ВПКМ может составлять 30 мкм и меньше [26, 27, 28]. По данным компании Sandvik Coromant, допуск отверстий болтового соединения в пакетах из ВПКМ может составлять ±20–40 мкм [29].

С другой стороны, известны работы, в которых экспериментально доказано, что малые зазоры также снижают несущую способность соединения деталей из ВПКМ.

Так, в работах [18, 24, 31] исследовались болтовые соединения пакетов, включающих ВПКМ, с зазорами от 0 до 240 мкм. Большие зазоры (от 240 мкм и более) приводят к потере жесткости болтового соединения со многими болтами в результате неравномерного нагружения и повреждения отдельных отверстий с последующим их разрушением. Преждевременное разрушение происходит также и при малых зазорах, но в результате нарушения целостности болтов из-за неравномерного их нагружения. Поэтому для соединений диаметром 8 мм зазоры от 80 до 160 мкм являются наиболее приемлемыми [24].

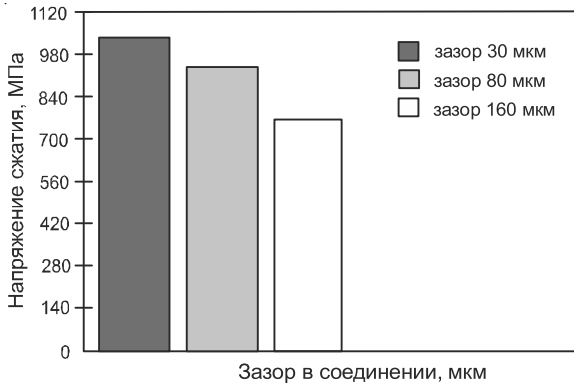



**Рис. 2.32.** Влияние зазора в болтовом соединении на напряжения смятия в ВПКМ [30]

В силу особенностей соединений в конструкциях самолета ***соосность отверстий*** соединяемых деталей достигается совместной обработкой отверстий в пакете или регулировкой компенсаторами [5]. Операция регулировки является одной из самых дорогостоящих при изготовлении планера самолета. Детали, изготовленные из ВПКМ, требуют значительно большего количества регулировок по сравнению с подобными элементами, изготовленными из металлов. Это вызвано двумя основными причинами:

1) точность деталей из ВПКМ ниже, чем металлических из-за вариации толщин листов из ВПКМ, связанной с незначительными изменениями в сложном составе смолы, вариации в предварительно пропитанном волокнистом наполнителе и удалении остатков смолы во время изготовления;
2) ВПКМ плохо переносят сжатие из-за большого модуля упругости и низкой пластичности.

При работе с толстыми листами из ВПКМ к уже упомянутым проблемам добавляется еще и расслаивание.

В реальных производственных условиях в процессе изготовления возможно возникновение различных повреждений отверстий. Некоторые экспериментальные исследования для пластин из стеклопластика, например V. Tagliaferri et al. [33], позволили выявить, что прочность на растяжение пластин с отверстием не зависит от степени повреждения отверстия, в том числе и на его кромке, а прочность на смятие зависит от степени повреждения, но в случае если это повреждение является очень большим. Более того, образцы с дефектами, вызванными механической обработкой отверстий имеют всего лишь несколько меньшие значения сопротивления усталости, чем образцы без дефектов [34]. E. Persson et al. [35] показали, что образцы, в которых отверстия выполнены сверлами в виде трехгранной пирамиды и спиральными сверлами с покрытием из поликристаллического алмаза (ПКА), имеют на 8–10% меньшую усталостную прочность и на 2–11% меньшую статическую прочность по сравнению с образцами, отверстия в которых выполнены спиральным фрезерованием, обеспечивающим меньшее расслаивание.

Наконец, незначительное влияние подачи, скорости резания и других условий резания на прочность на смятие образцов из углепластика (рис. 2.33), установленное в работе [12], также доказывает положение о малой чувствительности прочности деталей из ВПКМ к повреждениям отверстий. Вместе с тем повреждения отверстий стараются

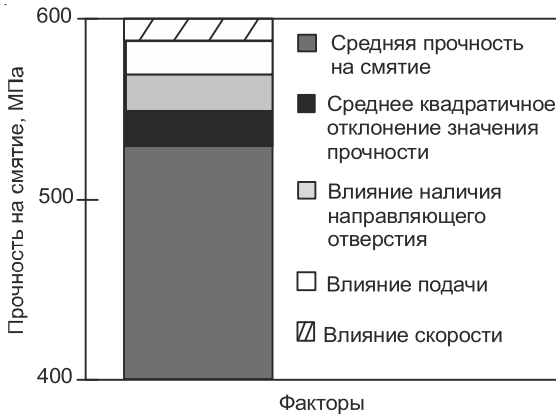



**Рис. 2.33.** Влияние различных факторов на прочность на смятие пластин из углепластиков [12]

не допускать. Обычно считается, что характерный размер повреждения не должен превышать 0,76 мм. Если же размер повреждения больше этой величины, то в зависимости от диаметра отверстия, вида соединения и служебного назначения детали принимается решение о его устранении. Повреждения с размерами в пределах от 0,76 до 2,54 мм считаются исправимым браком и исправляются без изменения диаметра отверстия.

Повреждения с размерами больше 2,54 мм исправляются увеличением диаметра отверстия или другим способом, приемлемым для данной конструкции [23].

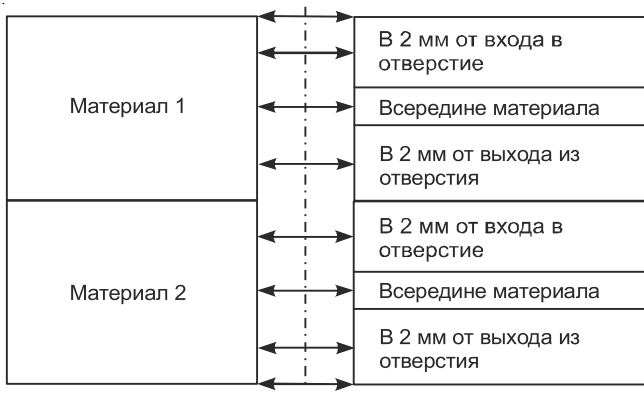



**Рис. 2.34.** Схема контроля качества отверстий в пакетах ВПКМ [29]

Проверка качества отверстий выполняется визуально или при помощи специальных средств измерений: калибры, нутромеры, кругломеры [23]. В силу того что размерная точность отверстия в зоне раздела материалов отличается от размерной точности отверстия в каждом из обрабатываемых материалов в отдельности, контроль отверстий, изготовленных в смешанных пакетах, осуществляется внутри слоев и на их границах (рис. 2.34).

В лабораторных условиях для выявления вида повреждения отверстия, кроме визуального осмотра, используются методы ультразвуковой дефектоскопии, радиографии и рентгеновской томографии. Следует отметить, что эти методы неприменимы для сравнения зон повреждения в пакетах из различных ВПКМ, имеющих, как правило, различные коэффициенты рассеивания. Кроме того, образец не может использоваться для механических испытаний повторно, поскольку поглощение жидкостей, применяемых для проявления повреждений, значительно снижает механические свойства ВПКМ [32].

## Выводы

Качество отверстий в деталях из ВПКМ в значительной степени определяет срок службы всего соединения. В силу неоднородного строения ВПКМ качество отверстий в однородных и смешанных пакетах, содержащих ВПКМ, регламентируется не только традиционными показателями: размерная точность и шероховатость поверхности, – но и дополнительными, определяющими повреждения отверстий: вид повреждения, диаметр зоны повреждения, характерный размер повреждения.

Характерными видами повреждений поверхности отверстий в ВПКМ являются расслаивание, сколы кромок отверстий, вытягивание волокон, межслоевые трещины, термическая деструкция, распушивание волокон. Несмотря на малую чувствительность прочности деталей из ВПКМ к повреждениям отверстий, значительных повреждений отверстий все же стараются избегать. Допустимая величина характерного размера повреждения, как правило, не больше 1 мм. Шероховатость обработанной поверхности не всегда дает полную информацию о качестве поверхности отверстий в деталях из ВПКМ вследствие выступания над дефектным поверхностным слоем несрезанных волокон волокнистого наполнителя, т.е. их распушивания.

Наличие металлических слоев в смешанных пакетах усложняет выполнение отверстий заданного качества по всей толщине пакета из-за термического и механического воздействия стружки на поверхность отверстий в слое из ВПКМ, а также образования заусенцев в металлических слоях.

Качество изготовления отверстий в однородных и смешанных пакетах может быть улучшено путем повышения жесткости технологической системы, использования рациональной геометрии сверла, обеспечивающей надежное дробление стружки и срезание припуска за несколько проходов, выбора оптимальной скорости резания и подачи, обеспечения надежности закрепления и сжатия пакета, применения операции развертывания отверстия после сверления, периодического вывода сверла из отверстия, обеспечивая удаление стружки без ее пакетирования.

РАЗДЕЛ 3

# Основы резания волокнистых полимерных композиционных материалов

## 3.1. Механика прямоугольного резания

Фундаментальные особенности формирования стружки и качество обработанной поверхности при резании ВПКМ, в том числе и углепластиков, изучаются на основе процесса прямоугольного резания. Современные представления об этом процессе описаны в работах A. Koplev et al. [81], T. Kaneeda и T. Masayuki [82], D. Arola et al. [83], I. Singh et al. [69], A. T. Marques, L. M. Durão [12, 41], L. Lasri [84], X. M. Wang и L. C. Zhang [85], Komanduri [86], Zitoune et al. [55], Н. В. Верезуба и А. П. Тарасюка [181] и др. Подробная информация о механике стружкообразования может быть найдена в обзорах [12, 28, 71, 87, 88].

### 3.1.1. Стружкообразование

В отличие от полимеров и квазиизотропных полимерных композиционных материалов (например, термопластов на основе бумаги, КМ, упрочненных короткими волокнистым наполнителем или частицами) ВПКМ проявляют высокую анизотропию свойств вследствие своей слоистой структуры. Это существенным образом изменяет процесс стружкообразования при резании таких материалов, делая его абсолютно непохожим на достаточно хорошо изученные процессы резания металлических материалов, в том числе и хрупких.

Стружкообразование при резании однонаправленных в значительной степени сильно зависит от угла направленности волокон (рис. 3.1) и в меньшей степени от переднего угла. Режим стружкообразования для определенной направленности волокон определяет конечное качество обработанной поверхности и динамическую характеристику силы

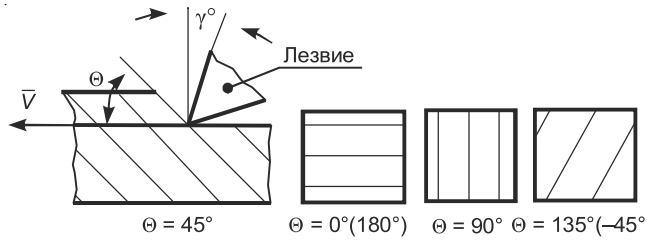



**Рис. 3.1.** Угол направленности волокон относительно направления вектора скорости главного движения резания $\bar{V}$ [71]

резания. В зависимости от направленности волокон и величины переднего угла лезвия инструмента, формируется один из пяти типов стружки (рис. 3.2, 3.3). Следует отметить, что формирование классической сливной стружки для процессов обработки ВПКМ не является характерным.

**Стружка расслаивания (тип I)** образуется при резании ВПКМ с углом направленности волокон $\theta \to 0^\circ$ инструментом с положительным передним углом (рис. 3.2а). При внедрении лезвия перед режущей кромкой зарождается трещина, которая распространяется по границе «волокнистый наполнитель – матрица», т.е. перед лезвием формируется опережающая трещина отрыва. Стружка скользит по передней поверхности, воспринимая нагрузки подобно консольной балке при изгибе и в конечном счете ломается перпендикулярно волокнистому наполнителю с малой величиной пластической деформации, когда изгибающие напряжения превышают прочность волокон на изгиб. При таком механизме стружкообразования имеют место достаточно большие колебания силы резания. Поверхность, образуемая в результате разрушения срезаемого слоя, гладкая и характеризуется расположением разломанных слоев в направлении вектора скорости резания и значительным «размазыванием» материала матрицы вследствие контакта в результате упругого восстановления матрицы задней поверхности лезвия с вновь образованной поверхностью (рис. 3.3а).

**Стружка продольного изгиба (тип II)** образуется при резании ВПКМ с углом направленности волокон $\theta \to 0^\circ$ инструментом с нулевым или отрицательным передним углом (рис. 3.2б). В этом случае материал срезаемого слоя подвергается сжатию. Это вызывает его продольный изгиб и формирование трещины сдвига вдоль границы «волокнистый наполнитель – матрица», что в итоге приводит к разрушению волокон под действием напряжений сжатия и изгибающего момента в на-

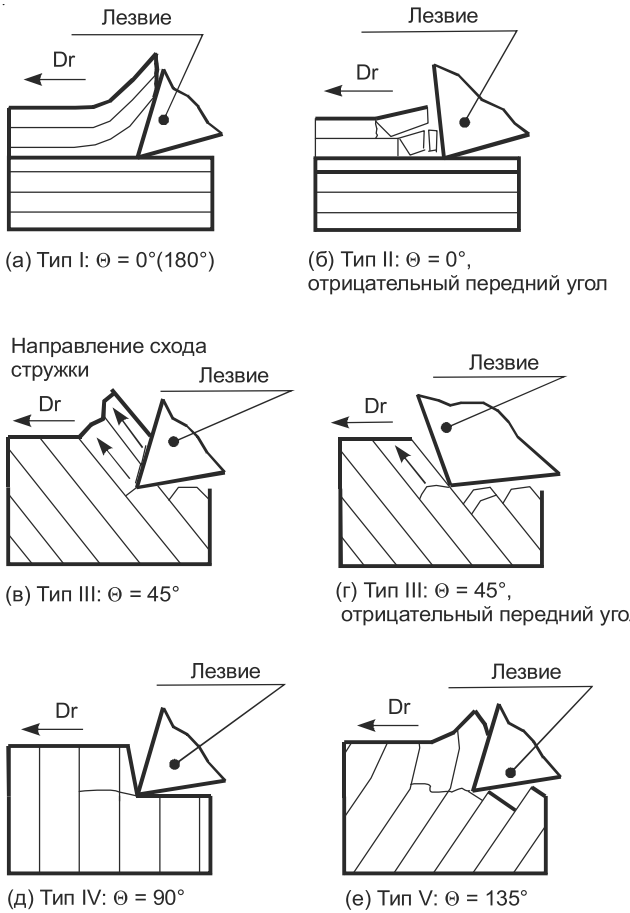
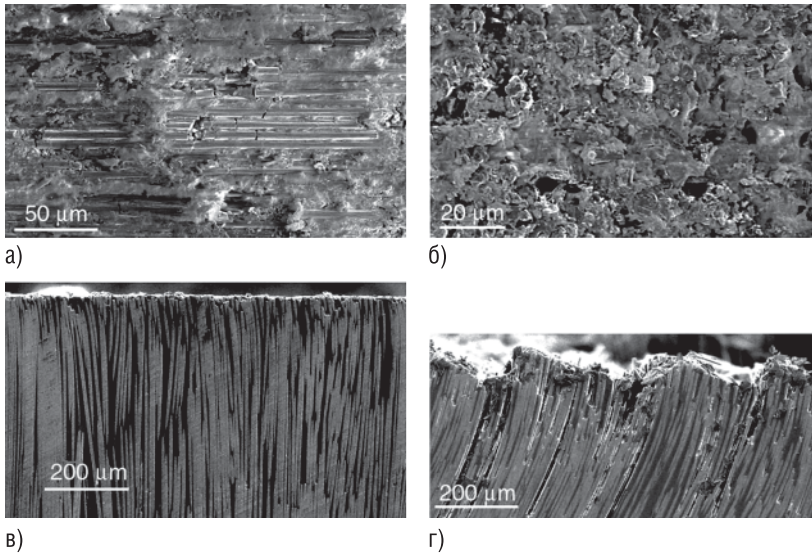



**Рис. 3.2.** Механизмы стружкообразования и типы стружек, формирующихся при прямоугольном резании углепластика остро заточенным лезвием [71]

правлении, перпендикулярном направлению расположения волокон в срезаемом слое. Это разрушение происходит вблизи передней поверхности лезвия и способствует образованию коротких элементов стружки. Колебания силы в этом случае меньше, чем при формировании стружки типа I. Поверхность, образуемая в результате разрушения срезаемого слоя, аналогична поверхности, образуемой при формировании стружки расслаивания.




а) б)

в) г)

**Рис. 3.3.** Микроструктура обработанной поверхности углепластика, если $\theta = 0°$ (*а*), $\theta = 90°$ (*б*), $\theta = 90°$ (*в*), $\theta = 120°$ (*г*) [85]: $\gamma = 20°$, $a = 0{,}1$ мм

**Стружка, формируемая срезанием волокон (тип III** и **тип IV),** образуется при резании ВПКМ в условиях, когда волокна ВПКМ разрушаются перпендикулярно к своим осям в результате межслоевого сдвига со сжатием. Этот режим может иметь место в диапазоне углов направленности волокон в пределах $0° < \theta < 90°$ практически при любой величине переднего угла (рис. 3.2в, г). В момент сжатия срезаемого слоя трещины могут формироваться как выше, так и ниже от поверхности резания. Трещины являются визуально различимыми с помощью микроскопа. Они формируются ниже поверхности резания и могут оставаться в обработанной поверхности. Дальнейшее перемещение инструмента сопровождается межслоевым сдвигом, что приводит к перемещению стружки по передней поверхности. Такое поведение ВПКМ подобно стружкообразованию сдвигом как при резании металлов с тем отличием, что величина пластической деформации крайне мала. Показатели процесса резания при формировании такой стружки определяются свойствами ВПКМ и способностью сопротивляться сдвигу в плоскости армирования. В зависимости от объема деформации сдвига можно получить либо суставчатую стружку

(рис. 3.2в, г) при $\theta < 75^\circ$ (тип III), либо элементную (рис. 3.2д) при $\theta \to 90^\circ$ (тип IV). Стружка IV типа часто очень похожа на порошок или пыль. Силы резания характеризуются самыми низкими колебаниями, а шероховатость обработанной поверхности определяется выступающими волокнами и трещинами (рис. 3.3б, в).

**Стружка макроразрыва (тип V)** образуется при резании ВПКМ с большими углами направленности волокон ($105^\circ < \theta < 150^\circ$) и сопровождается макроразрушением ВПКМ. По мере внедрения инструмента возникают деформации ВПКМ, приводящие к расслоению, сдвигу волокон и внеплоскостным перемещениям. Из-за воздействия режущей кромки на боковую сторону волокон возникает их существенный изгиб, что вызывает образование трещин и формирование длинных элементов стружки (рис. 3.2е). Вследствие разрушения в зоне, расположенной под поверхностью резания, толщина стружки V типа, как правило, значительно больше толщины среза. После разрушения волокон сразу возникает упругое восстановление обработанной поверхности и края выступающих волокон оказывают абразивное воздействие на заднюю поверхность инструмента (рис. 3.3г).

### 3.1.2. Влияние различных факторов на процесс стружкообразования

Исследования показывают, что механизм стружкообразования и тип стружки при резании ВПКМ зависят от угла направленности волокон $\theta$ по отношению к направлению вектора скорости главного движения резания $V$, переднего угла $\gamma$, радиуса округления режущей кромки $\rho$, материалов матрицы и волокнистого наполнителя, характера армирования.

**Угол направленности волокон** $\theta$ и **передний угол** $\gamma$ оказывают на механизм стружкообразования и тип стружки при резании ВПКМ наибольшее влияние (рис. 3.4). При резании с расположением вектора скорости резания параллельно волокнам ($\theta = 0^\circ$) инструментом с большим положительным передним углом $\gamma$ стружка формируется за счет расслаивания и хрупкого излома.

При резании с нулевым и отрицательным передним углом $\gamma$ стружка формируется за счет сжатия с продольным изгибом волокнистого наполнителя. При положительной направленности волокон в диапазоне $0^\circ < \theta \le 75^\circ$, когда срезание волокон является основным видом стружкообразования, передний угол $\gamma$ не имеет явного влияния

| Передний угол γ, ° | Угол направленности волокон θ, ° | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 15 | 30 | 45 | 60 | 75 | 90 | 105 | 120 | 135 |
| 30 | I | III | III | III | III | IV | IV | | | |
| 20 | I | III | III | III | III | IV | IV | | | V |
| 10 | I | III | III | III | III | IV | IV | V | V | V |
| 0 | II | III | III | IV | IV | IV | V | V | V | V |
| –10 | II | IV | III | IV | IV | IV | | | | |
| –20 | | | | IV | | | V | | | V |

**Рис. 3.4.** Влияние угла направленности волокон θ и переднего угла γ на тип стружки при резании ВПКМ: I – стружка расслаивания; II – стружка продольного изгиба; III – стружка суставчатая; IV – стружка элементная; V – стружка макроразрыва

на механизм формирования стружки. Однако в этих условиях передний угол γ оказывает решающее влияние на тип стружки, определяя прочность связей между отдельными элементами. При большом положительном переднем угле γ формируется суставчатая стружка. Уменьшение же переднего угла γ приводит к формированию элементной стружки. При резании перпендикулярно волокнистого наполнителя ВПКМ инструментом с положительным передним углом γ стружка формируется за счет срезания волокнистого наполнителя, а инструментом с нулевым или отрицательным передним углом γ – за счет макроразрыва [71].

**Задний угол** α не оказывает существенного влияния на механизм формирования стружки или топографию обработанной поверхности, за исключением незначительного повышения качества обработанной поверхности при больших значениях α [71].

**Радиус округления режущей кромки.** В условиях резания с малым отношением толщины среза *a* к радиусу округления режущей кромки ρ механизмы стружкообразования изменяются с изменением ρ. Если радиус округления режущей кромки ρ соизмерим или меньше поперечного размера волокнистого наполнителя, то волокна легко срезаются и процесс эквивалентен процессу резания абсолютно острым лезвием (рис. 3.2). Когда радиус округления режущей кромки ρ приблизительно в пять-десять раз больше диаметра волокна, волокна отталкиваются (упруго отжимаются) и плохо срезаются (рис. 3.5) [40, 89].

В процессе внедрения инструмента срезаемый слой разделяется на две области – область упругого сжатия и область стружкообразова-

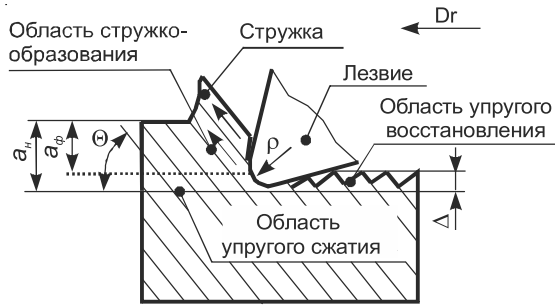



**Рис. 3.5.** Схема формирования стружки при резании лезвием с округленной режущей кромкой [71]

ния. Материал в области упругого сжатия подвергается деформации со стороны режущей кромки, а затем после прохождения инструмента, упруго восстанавливается.

Материал в стружке скользит по передней поверхности благодаря сдвигам между слоями в плоскостях, параллельных волокнистому наполнителю. Этот процесс похож на механизм формирования суставчатой стружки (тип III) при резании инструментом с острой режущей кромкой ($\rho \to 0$). В зависимости от отношения толщины среза $a$ к радиусу округления режущей кромки $\rho$ (при $\rho > 0$) изменяются размер области сжатия перед лезвием и величина упругого восстановления $\Delta$.

Фактическая толщина среза $a_ф$ при резании ВПКМ всегда меньше номинальной $a_{н.}$ Вследствие малой величины модуля упругости ВПКМ минимальная величина номинальной толщины среза $a_н$, при которой начинает формироваться стружка, обычно не меньше радиуса округления режущей кромки $\rho$. Так, например, в опытах X.M. Wang, L.C. Zhang [85] по прямоугольному резанию ВПКМ лезвием с $\rho = 50$ мкм при $\theta = 30^\circ$ образование стружки наблюдалось лишь при номинальных толщинах среза более 100 мкм (рис. 3.6). При меньших толщинах среза преимущественно происходило упругое сжатие материала под режущей кромкой и его последующее упругое восстановление на величину $\Delta$. Величина восстановленной области $\Delta$ ощутимо увеличивалась с увеличением номинальной толщины среза $a_н$ до 100 мкм, а при дальнейшем увеличении толщины среза $\Delta$ оставалась практически неизменной (рис. 3.6, кривая 2). Фактическая толщина среза $a_ф$ ($a_ф = a_н - \Delta$), при которой формировалась стружка, резко увеличивалась

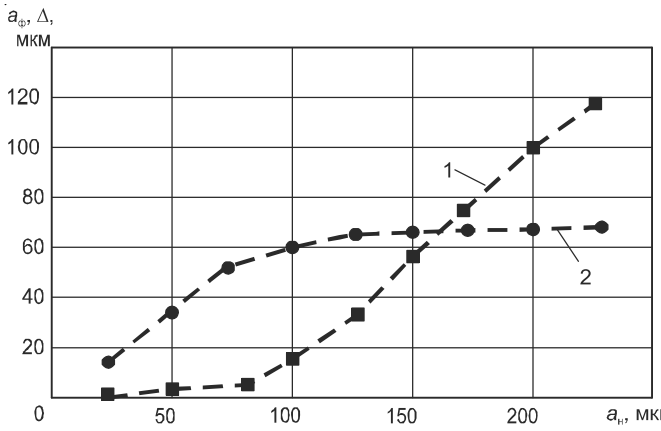



**Рис. 3.6.** Влияние номинальной толщины среза $a_н$ при резании углепластика лезвием с округленной режущей кромкой на фактическую толщину среза $a_ф$ (кривая 1) и величину упругого восстановления Δ (кривая 2) [85]: $V$ = 1 м/мин, θ = 30°, ρ = 50 мкм

при увеличении номинальной толщины среза более чем 100 мкм (рис. 3.6, кривая 1).

При резании с $a_н >> \rho$ с ориентацией волокон в пределах $0° < \theta < 90°$ величина упругого восстановления Δ практически равна ρ, а при $\theta > 90°$ может быть в два и более раз больше ρ. Таким образом, по сравнению с величиной Δ при резании металлов величина Δ при резании ВПКМ в несколько раз больше. Это особое поведение ВПКМ отражается на величине радиальной проекции силы резания, которая при резании ВПКМ формируется упруго восстановленным материалом, воздействующим на заднюю поверхность лезвия [71].

Величина ρ оказывает существенное влияние на показатели процесса резания и поэтому должна контролироваться при изготовлении режущих инструментов для обработки ВПКМ [47].

**Материал матрицы** также влияет на процесс формирования стружки. Из-за различия в физических и механических свойствах термопластов и реактопластов при их резании образуются различные стружки. Армированные углеволокном реактопласты (углепластики), которые являются более прочными и более хрупкими по сравнению с термопластами, образуют элементную, порошкообразную стружку за счет хрупкого разрушения матрицы и волокнистого наполнителя

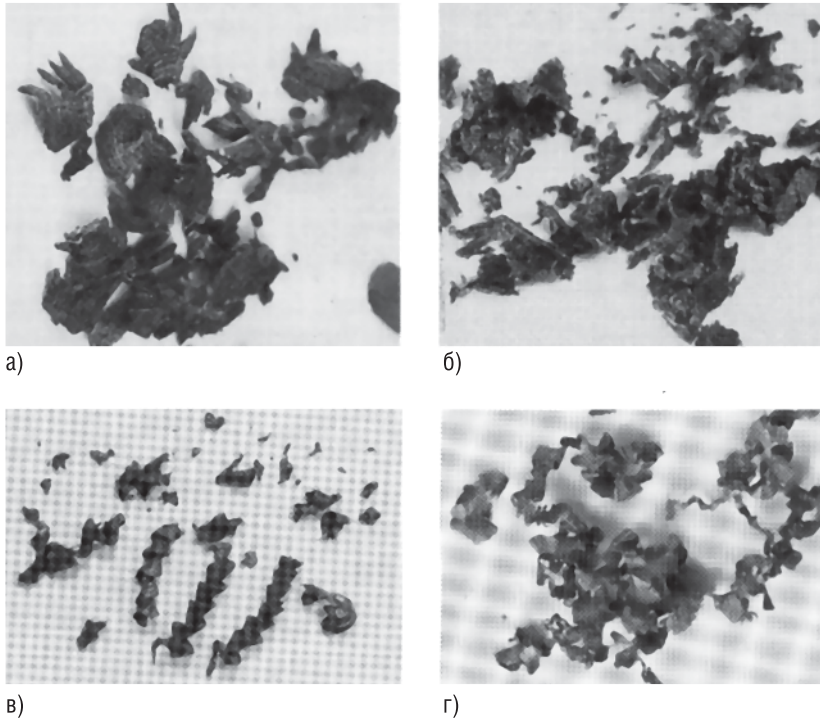



**Рис. 3.7.** Примеры стружек углепластиков на основе эпоксидной смолы (а, б) и PEEK-матрицы (в, г) [90]:(а) V = 8 м/мин, S = 0,6 мм/об, (б) V = 6,3 м/мин, S = 0,075 мм/об, (в) V = 2 м/мин, S = 0,4 мм/об, (г) V = 4,7 м/мин, S = 0,067 мм/об

(рис. 3.7а, б). При этом может наблюдаться растрескивание материала матрицы.

При резании же пластичных термопластов образуется суставчатая стружка за счет превалирующей пластической деформации матрицы (рис. 3.7в, г). Это связано со способностью термопластов воспринимать при повышенных температурах, возникающих при резании, большие деформации растяжения и сдвига между углеводородными цепями. Морфология стружки при резании термопластов и реактопластов зависит и от режима резания. При высоких скоростях резания и малых подачах в реактопластах интенсивно образуются трещины из-за высокой скорости деформации, и размер стружки уменьшается. В термопластах возникает значительная деформация из-за повышенных

температур в зоне резания. Это приводит к образованию длинной лентообразной стружки. Низкие скорости резания и большие подачи приводят к образованию толстой лентообразной стружки при резании как термопластов, так и реактопластов.

**Материал волокнистого наполнителя.** В зависимости от механических и физических свойств волокнистого наполнителя ВПКМ также проявляют различные механизмы разрушения и морфологию стружки при резании. При резании ВПКМ, армированных угле- и стекловолокном, наблюдается хрупкий излом волокон, а при резании ВПКМ на основе арамидных волокон – пластический разрыв волокнистого наполнителя. Резание ВПКМ на основе стекловолокна сопровождается частичным изгибом волокнистого наполнителя и образованием трещин. Это приводит к вырыванию волокон из материала матрицы. Поскольку стекло является аморфным материалом, поверхность разрыва стеклянных волокон более гладкая по сравнению с другими волокнами (рис. 3.8а). С другой стороны, резание ВПКМ на основе углеродистых волокон сопровождается образованием стружки путем хрупкого разрушения волокон при очень небольшой относительной деформации. Можно заметить зубчатые поверхности разрыва с отдельными гранями, наклоненными к оси волокна (рис. 3.8б). Самосмазывающий эффект углеродистых и графитовых волокон способствует более легкому скольжению по матрице, благодаря чему углепластик приобретает склонность к нарушению сцепления между волокнами и матрицей.

Волокна арамида обладают большей пластичностью, чем стеклянные и углеродистые. Это позволяет им значительно больше сгибаться под действием движущегося лезвия. Поэтому ВПКМ на основе арамидных волокон тяжело поддаются обработке резанием, и при этом образуется большое количество скрученных волокон (рис. 3.8в).

**Направление армирования.** На практике однонаправленные ВПКМ применяются сравнительно редко. Более широко используются разнонаправленные ВПКМ. Исследованиям резания ВПКМ такой структуры посвящены работы T. Kaneeda и D.H. Wang [82], M. Ramulu, D. Arola [91] et al. Исследователи установили, что закономерности резания этих материалов подобны тем, что описаны ранее для однонаправленных ВПКМ. При прямоугольном резании каждый слой в разнонаправленной структуре ведет себя независимо от окружающих слоев. Силы резания при резании разнонаправленных ВПКМ могут быть рассчитаны путем сложения сил резания, соответствующих каждому однонаправленному слою. Кроме того, характеристики обработанной

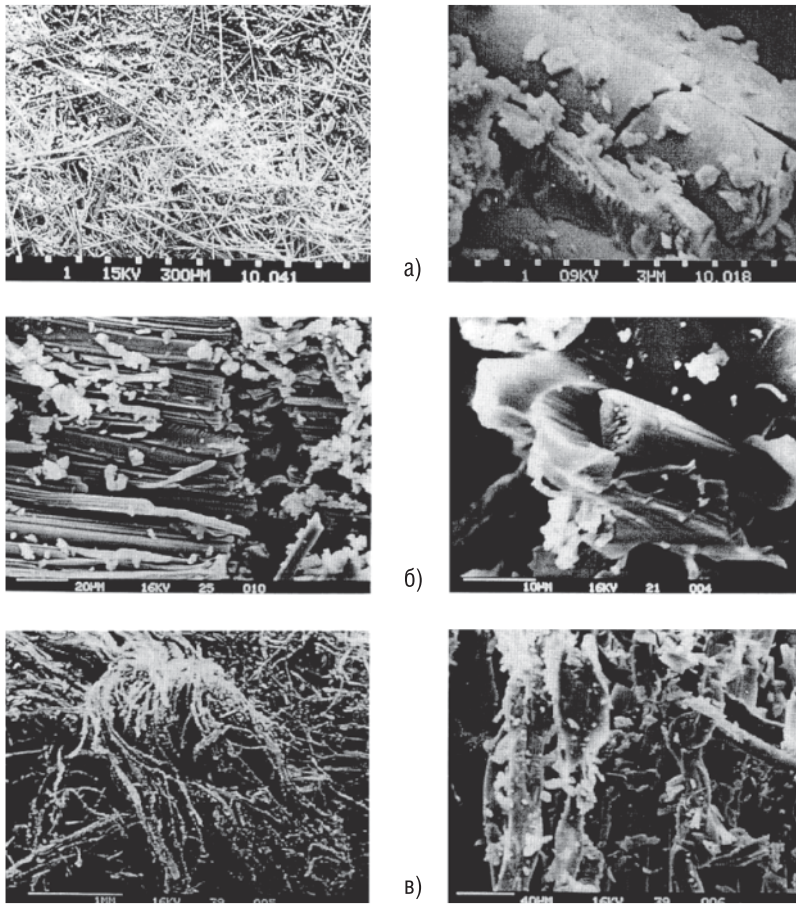



**Рис. 3.8.** Фотографии с РЭМ стружки ВПКМ [91]: а – стеклопластик; б – углепластик; в – АКМ на основе арамидных волокон

поверхности индивидуальных слоев в разнонаправленных ВПКМ очень напоминают характеристики, получаемые после обработки однонаправленных ВПКМ. Однако окружающие слои ограничивают внеплоскостную деформацию, которая характерна для резания однонаправленных ВПКМ.

Таким образом, особенности строения ВПКМ и их разрушение в значительной степени характеризуют специфические условия

процессов стружкообразования и износа рабочих поверхностей лезвийного инструмента. К ним можно отнести:

- сравнительно малую межслоевую прочность ВПКМ, способную привести к расслаиванию ВПКМ под действием сил резания. Для предотвращения этого необходимо кинематически обеспечивать направление сил резания для сжатия слоев ВПКМ между собой;
- малую пластичность ВПКМ, приводящую к образованию при резании элементной стружки (IV тип);
- значительную упругость материала, которая вызывает уменьшение диаметра отверстий при их обработке, а также большие силы трения на задних поверхностях инструмента, требующие увеличения задних углов лезвия инструмента;
- токсичность и вредность стружки, вызывающие необходимость в их эффективном удалении из зоны обработки по всей площади стружечных канавок;
- малая теплопроводность ВПКМ, приводящая к интенсивному разогреву инструмента даже при относительно небольших скоростях резания;
- нежелательность применения смазочно-охлаждающих жидкостей при резании вследствие снижения прочностных и электрических свойств ВПКМ при смачивании.

### 3.1.3. Влияние различных факторов на силу резания

Сила резания при обработке ВПКМ зависит от угла направленности волокон $\theta$, механических свойств ВПКМ, угла трения $\mu$, геометрии инструмента, режима резания и др.

**Угол направленности волокон.** Ориентация волокон оказывает, пожалуй, наибольшее влияние из всех перечисленных факторов, поскольку изменяет режим стружкообразования и тип стружки (табл. 3.1). С увеличением угла направленности волокон $\theta$ приблизительно до 60° тангенциальная проекция силы резания $P_z$ медленно увеличивается. Далее при приближении к $\theta = 90°$ наблюдается ее резкое увеличение (рис. 3.9). При дальнейшем увеличении угла $\theta$ тангенциальная проекция силы резания уменьшается. Существенное снижение ее величины наблюдается в диапазоне $\theta = 100–165°$. Радиальная проекция силы резания $P_y$ хоть и уменьшается, но в значительно меньшей степени, чем $P_z$.

**Таблица 3.1.** Влияние угла направленности волокнистого наполнителя на силы резания [12]

| Угол направленности волокон θ | Характер изменения силы резания | Примечание |
|---|---|---|
| от 0 до 60° | увеличивается | - |
| от 60 до 120° | уменьшается | при большой толщине среза *a* – увеличивается |
| больше 120° | увеличивается | при большой толщине среза *a* – уменьшается |

По данным большинства исследователей, при направленности волокон $0^\circ < \theta \le 75^\circ$ радиальная проекция силы резания $P_y$ больше, чем тангенциальная проекция силы резания, соответствующая тем же условиям обработки (рис. 3.9, 3.10), что является отличительной особенностью процесса резания ВПКМ по сравнению с лезвийной обработкой металлов, при которой тангенциальная проекция силы резания $P_z$ всегда больше радиальной $P_y$.

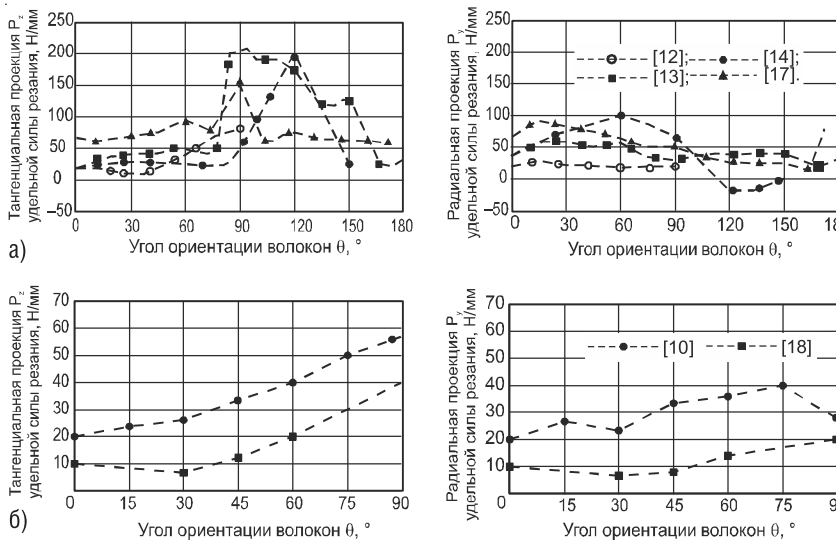



**Рис. 3.9.** Влияние угла направленности волокон θ на проекции удельной силы резания при прямоугольном резании стеклопластиков (а) и углепластиков (б) по данным различных исследователей [71] (условия резания – в табл. 3.2, 3.3)

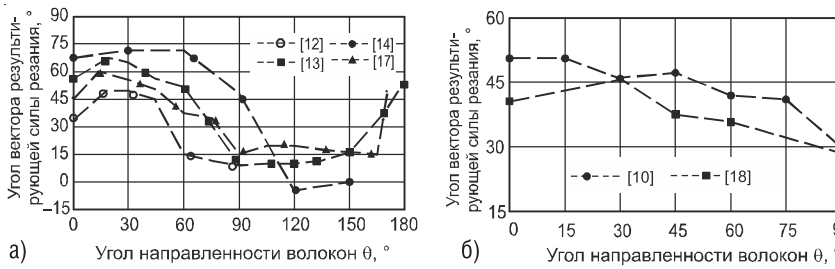



**Рис. 3.10.** Влияние угла направленности волокон θ на угол вектора результирующей силы резания при прямоугольном резании стеклопластика (а) и углепластика (б) по данным различных исследователей [71] (уловия резания – в табл. 3.2, 3.3)

**Таблица 3.2.** Условия резания для данных на рис. 3.9, 3.10, 3.11 [71]

| Источник | Скорость резания $V$, м/мин | Толщина среза $a$, мм | Ширина среза $b$, мм | Материал режущей части | Задний угол $\alpha$,° | Передний угол $\gamma$,° | Радиус округления режущей кромки $\rho$, мкм |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| [85] | 1,00 | 0,05 | 4,00 | – | 20 | 7 | 50 |
| [82] | 0,02 | 0,10 | 2,28 | К10 | 10 | 10 | 2 |
| [92] | 4,00 | 0,25 | 4,00 | ПКА | 10 | 17 | – |
| [93] | 1,18 | 0,25 | 2,20 | К20 | 12 | – | – |
| [94] | 0,50 | 0,10 | 4,00 | К10 | 10 | 6 | 20 |
| [95] | 100 | 0,10 | 5,00 | – | 5 | – | – |

Следует учитывать и то обстоятельство, что при резании ВПКМ у радиальной проекции силы резания $P_y$ более сложное поведение, чем у тангенциальной проекции $P_z$. При резании ВПКМ с малыми положительными θ происходит увеличение $P_y$, тогда как при дальнейшем увеличении θ она уменьшается (см. рис. 3.10). Большие значения $P_y$, вероятно, связаны с упругим восстановлением волокон, которые перед разрушением в пределах области контакта с лезвием подверглись деформации (см. п. 3.1.2). После разделения волокон выделяется энергия упругой деформации, приводящая к упругому восстановлению вновь образованной поверхности и, соответственно, к возникновению на задней поверхности инструмента радиальной проекции силы резания. Следует отметить возрастание колебаний силы резания с увеличением угла направленности волокон θ (рис. 3.11). Наибольшая амплитуда

**Таблица 3.3.** Механические свойства однонаправленных КМ, которые использовались в экспериментах на рис. 3.9, 3.10, 3.11 [71]

| Источник | Материал | Характерный диаметр волокнистого наполнителя $d$, мкм | $E_1$, ГПа | $E_2$, ГПа | $G_{12}$, ГПа | $\nu_{12}$ | $\sigma_{врпрод}$, ГПа | $\sigma_{врпоп}$, МПа | $\sigma_{вспрод}$, МПа |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| [85] | Углепластик | | 120 | | | | 1,33 | | 1,66 |
| [82] | Углепластик | 8 | 130 | 10 | 0,1 | | 1,95 | 0,05 | |
| [92] | Графито-пластик | | 117–138 | 9,0–11,0 | | | 1,38 | 0,04 | 1,31 |
| [93] | Углепластик | | 96,3 | 7,9 | 2,8 | 0,31 | 1,04 | 0,05 | |
| [94] | Стекло-пластик | | 48,0 | 12,0 | 6,0 | 0,29 | 0,55 | 0,03 | 0,4 |
| [95] | Стекло-пластик | 13 | 44,0 | 15,0 | | 0,3 | 1,2 | 0,06 | |

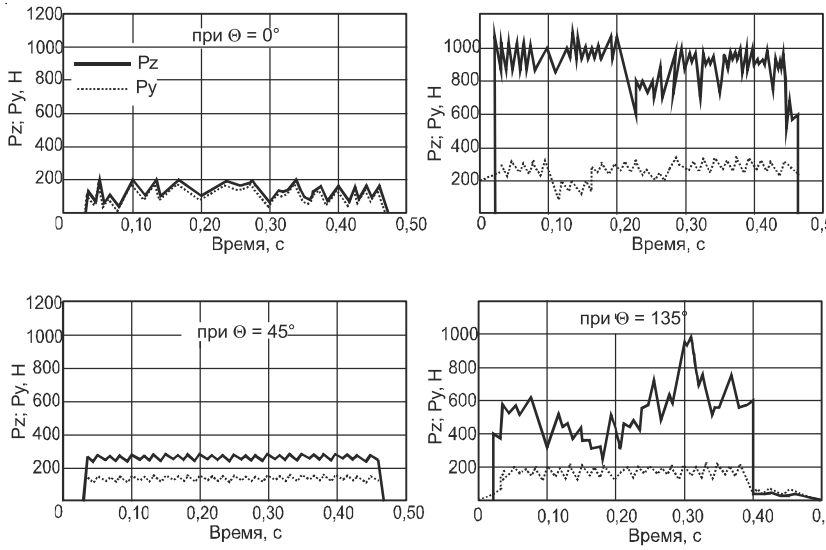



**Рис. 3.11.** Изменение во времени тангенциальной и радиальной проекций силы резания ВПКМ на эпоксидной основе: $V$ = 4 м/мин, $a$ = 0,25 мм, $\gamma$ = 10°, $\alpha$ = 17° [71]

наблюдается при $105° < \theta < 150°$, т.е при образовании стружки макроразрыва (тип V). Наибольшие колебания наблюдается при $\theta \to 90°$, т.е. при образовании элементной стружки (тип IV), а наименьшие при $\theta \to 45°$, т.е. при образовании суставчатой стружки (тип III).

**Угол трения.** Трение на рабочих поверхностях лезвия инструмента значительно влияет на напряжения и деформации в плоскости сдвига, соответственно, и на тип образующейся стружки. Угол трения $\mu$ при резании углепластиков значительно зависит от угла направленности волокон $\theta$, причем эта зависимость имеет почти синусоидальную форму. Данные об абсолютной величине угла трения $\mu$ при резании ВПКМ в различных публикациях существенно различаются (рис. 3.12), что, скорее всего, связано с различиями в этих исследованиях в оценке механизмов стружкообразования.

Вместе с тем тенденции изменения угла трения $\mu$ от угла направленности волокон $\theta$ (характер и вид зависимостей) в различных исследованиях практически идентичны. Увеличение угла трения $\mu$ при резании углепластиков с увеличением угла направленности волокон $\theta$ от 0° до 15° соответствует переходу от стружек типов I и II к стружке типа III (рис. 3.12а). При угле направленности волокон $15° \le \theta < 90°$, когда механизм стружкообразования для этих ВПКМ соответствует образованию стружки III типа, наблюдается существенное уменьшение угла трения $\mu$.

При резании стеклопластиков, в отличие от углепластиков, с изменением угла направленности волокон $\theta$ угол трения $\mu$ изменяется незначительно (рис. 3.12б).

**Геометрия инструмента.** С увеличением переднего угла $\gamma$ тангенциальная *Pz* и радиальная *Py* проекции силы резания уменьшаются. Это

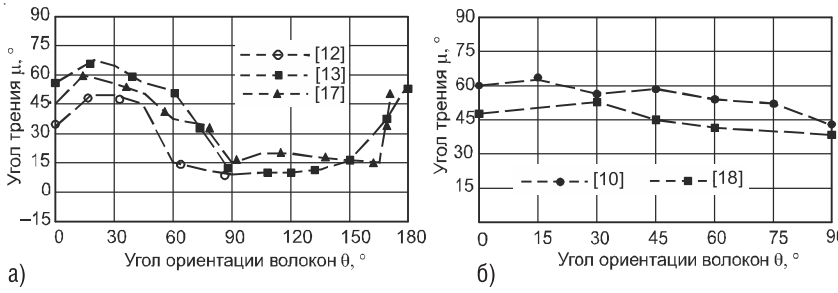



**Рис. 3.12.** Влияние угла направленности волокон $\theta$ на угол трения $\mu$ при обработке углепластика (а) и стеклопластика (б) по данным различных исследователей

связано с облегчением процессов отделения стружки и ее скольжения по передней поверхности при больших передних углах γ. Эта тенденция как для углепластиков, так и для стеклопластиков подтверждается большинством исследований. Исключением являются исследования D. H. Wang [92], который показал увеличение *Py* с увеличением переднего угла . От угла направленности волокон θ может существенно (для той или иной проекции силы резания) зависеть и градиент изменения силы резания с изменением переднего угла γ. Значительное уменьшение тангенциальной проекции силы резания происходит при $\theta > 60^\circ$, в то время как градиент уменьшения радиальной проекции силы резания практически не зависит от этого угла. D. Nayak отметил, что увеличение переднего угла γ более 30° приводит к увеличению тангенциальной проекции силы $P_z$ при резании однонаправленного стеклопластика [94]. В этом исследовании было предложено для обработки стеклопластиков считать оптимальным передним углом $\gamma = 30^\circ$.

Исследования влияния заднего угла α на проекции силы резания показывают, что его увеличение приводит к незначительному уменьшению тангенциальной проекции силы резания $P_z$, но в то же время вызывает значительное снижение радиальной проекции силы резания *Py*, что связано с уменьшением площадки контакта на задней поверхности лезвия инструмента с обработанной поверхностью при увеличении заднего угла α.

Влияние радиуса округления режущей кромки ρ на проекции силы резания должно рассматриваться совместно с толщиной среза (рис. 3.13). В предыдущем пункте было указано, что при резании

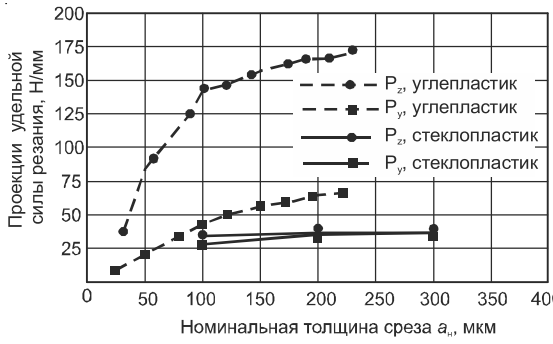



**Рис. 3.13.** Влияние номинальной толщины среза $a_н$ на проекции удельной силы резания при обработке углепластика [85] и стеклопластика [94] инструментом с округленной режущей кромкой [71]: θ = 30°, ρ = 50 мкм

с малой по сравнению с радиусом округления режущей кромки ρ толщиной среза *a* большая часть материала деформируется, сжимается и перемещается под заднюю поверхность лезвия инструмента, создавая радиальную проекцию силы резания, с последующим упругим восстановлением вновь образованной поверхности после прохождения инструмента. Это обусловливает нелинейное влияние толщины среза на проекции силы резания (рис. 3.13).

Вместе с тем при обработке стеклопластиков, как показал D. Nayak [94], толщина среза в отличие от резания углепластиков практически не влияет на силу резания (рис. 3.13), что обусловлено меньшим, чем у углепластика, модулем упругости.

### 3.1.4. Тепловые процессы

Тепловые процессы при резании ВПКМ подчиняются общим закономерностям классической теории тепловых процессов при резании металлов [96]. Вместе с тем удельная теплоемкость ВПКМ обычно больше, чем у металлов, а удельная теплопроводность значительно меньше (см. раздел 1). Поэтому при прочих равных условиях, если в заготовки из металла и ВПКМ поступит одно и то же количество теплоты, температура в заготовке из ВПКМ будет больше. В процессе резания теплота генерируется в результате деформаций в зоне первичных деформаций, трения между стружкой и передней поверхностью лезвия, а также трения между поверхностями (резания и обработанной) на обрабатываемой заготовке и задними поверхностями лезвия, соответственно, главными (примыкающими к главным режущим кромкам) и вспомогательными (на ленточках). При резании конструкционных сталей большая часть этой теплоты (около 70%) удаляется из зоны резания вместе со стружкой [96]. При резании ВПКМ из-за их низкой удельной теплопроводности теплота, генерируемая в зоне первичных деформаций, не передается лезвию быстро, и поэтому ее отвод в результате теплопередачи весьма ограничен. Отводиться может только теплота из тонкого граничного слоя на поверхностях контакта. Как было показано в [97], количество тепла, отводимое при лезвийной обработке ВПКМ из зоны первичных деформаций со стружкой, достигает 90% только при высоких скоростях резания. Интересно, что при шлифовании ВПКМ из-за низкой удельной теплопроводности, локализованный нагрев обработанной поверхности может вызвать ее перегрев, приводя к горению обработанной поверхности (для реактопластов) или к налипанию (для термопластов).

Вместе с тем температура резания при резании ВПКМ значительно ниже той, которая наблюдается при резании металлов в идентичных условиях. Например, в исследованиях M. Masuda et al. в процессе резания углепластиков при скорости резания 200 м/мин была зафиксирована температура 260 °С [98]. Подобные температуры были измерены и при резании древесностружечной плиты J.Y. Sheikh-Ahmad [99]. G. Spur et al. при резании стеклопластика со скоростью резания 200 м/мин были зафиксированы более высокие температуры – в пределах от 260 до 400 °С [100], что, скорее всего, связано с его малой удельной теплопроводностью [71].

## 3.2. Общие представления об износе инструментов

### 3.2.1. Виды износа

Непрерывное резание ВПКМ (на примере точения), как правило, сопровождается преимущественным изнашиванием по задним поверхностям (главной и вспомогательной) и увеличением радиуса округления режущих кромок в результате постепенного истирания контактных поверхностей лезвия. Большая часть изменений происходит на задней поверхности с формированием искривленной (криволинейной) границы площадки износа. В случаях, когда и главная, и вспомогательная режущие кромки участвуют в процессе резания, максимальный износ по задней поверхности наблюдается в зоне, примыкающей к вершине лезвия (рис. 3.14а).

В качестве характеристики изменений режущей кромки в процессе изнашивания инструментов при резании ВПКМ рассматривают ширину фаски износа на передней поверхности $h_п$, радиальный износ $h_р$, ширину фаски износа на задней поверхности $h_з$, радиус округления режущей кромки ρ (рис. 3.14б) [47, 101, 71].

Однако из-за сильного искривления поверхностей площадок износа измерение указанных характеристик с помощью оптического микроскопа затруднено и должно проводиться с особым вниманием. Часто измеряется и используется для описания износа лезвия только один параметр – ширина фаски износа на задней поверхности $h_з$. Однако один этот параметр не дает достаточно полной информации о профиле изношенной режущей кромки. Радиус округления режущей кромки ρ является более информативной характеристикой износа, но он сложнее в измерении. В квазистационарных условиях резания величина

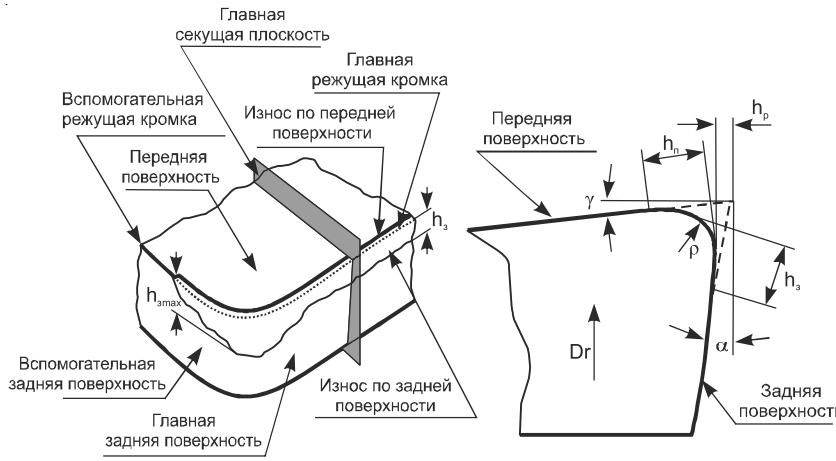



**Рис. 3.14.** Виды износа инструмента при обработке ВПКМ (а) и сечение режущего клина главной секущей плоскостью (б) [71]

радиуса округления режущей кромки имеет тенденцию стабилизироваться после окончания периода приработки и может практически не изменяться при дальнейшей работе инструмента [182].

Измерение характеристик износа инструмента также проблематично в случаях сложных конфигураций инструмента, например, абразивных инструментов и инструментов для снятия заусенцев. У этих инструментов в резании участвует множество режущих кромок, и износ их часто неоднороден [71]. В таких случаях лучше измерять износ инструмента косвенным методом путем контроля одного из выходных показателей процесса резания: силы или мощности резания, акустической эмиссии, звука и др. [175].

### 3.2.2. Механизмы изнашивания

Из всех известных механизмов изнашивания [102] отказ инструментов при резании ВПКМ вызывают, как правило, скол и выкрашивания режущей кромки, абразивное и химическое изнашивание [71]. В то время как скол приводит к внезапному и катастрофическому разрушению режущей кромки в первые моменты резания, остальные механизмы способствуют постепенному прогрессирующему измене-

нию формы лезвия в последующие периоды резания. Поскольку температура резания при обработке ВПКМ относительно низкая (см. п. 3.1.4) и не способствует высокой скорости химических реакций, интенсивность изнашивания при резании этих материалов главным образом определяется механическими процессами.

С механическим удалением микроскопических частиц материала лезвия с его поверхности связаны выкрашивание и абразивное изнашивание. Выкрашивание режущей кромки возникает в условиях, когда режущий инструмент или технологическая система не имеют достаточной жесткости, чтобы противостоять чрезвычайно изменяющимся силам резания, большой глубине резания и/или переменным нагрузкам.

Абразивное изнашивание лезвия в основном связано с истирающим действием на поверхностях контакта «стружка – лезвие» и «лезвие – обработанная поверхность» твердых составляющих, которые входят в состав обрабатываемого ВПКМ [28, 41]. В основном это материал волокон. Абразивное изнашивание происходит и на передней, и на задней поверхности инструмента, однако на задней поверхности интенсивность этого процесса наибольшая. В результате абразивного изнашивания на режущей кромке формируются «ребристые» зоны и увеличивается ее радиус округления, что в конечном счете усложняет процесс стружкообразования (см. п. 3.1.2) и повышает температуру резания [40, 89].

Следует отметить, что абразивное изнашивание по задней поверхности вдоль режущей кромки неоднородно не только по причине ее различной загруженности, но и из-за различных свойств ВПКМ в зоне каждого, даже малого контактного участка ее длины. Фаска износа отражает такое изменение свойств материла обрабатываемой заготовки, в т.ч. абразивных свойств отдельных волокон и полимерных фаз в различных слоях. Действительно, описанные ранее механизмы стружкообразования (см. п. 3.1.1) определяют более интенсивное трение волокон на задней поверхности инструмента при угле направленности волокон $\theta$, равном $+45^\circ$, и оказывает меньшее влияние при угле направленности волокон $\theta$, равном $0^\circ$ и $90^\circ$. Это влияние усиливается с увеличением радиуса округления режущей кромки $r$ (см. п. 3.1.2). В этом случае объем деформируемого лезвием материала увеличивается, тем самым увеличивая трение и износ на задней поверхности. Такой эффект был выявлен в работах D. Iliescu [89] при исследованиях прямоугольного резания многослойного углепластика. Зависимость интенсивности износа от направленности волокон показана на рис. 3.15.

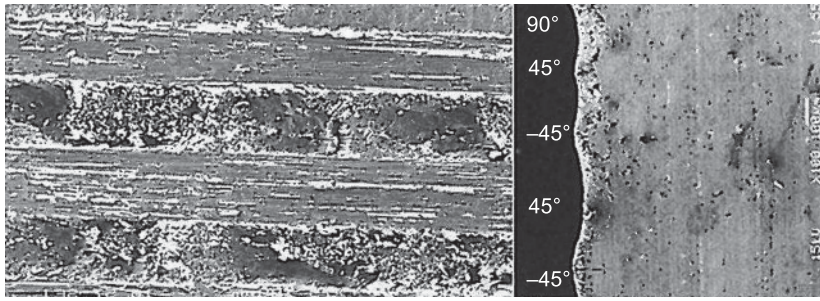



**Рис. 3.15.** Влияние направленности волокон на абразивный износ инструмента при точении углепластика инструментом твердого сплава К20: длина пути резания – 100 м; $\gamma = 0°$; $V = 60$ м/мин; $S = 0{,}1$ мм/об [89]

F. Girot [103] также показал эту особенность при фрезеровании как углепластика, так и стеклопластика алмазными инструментами.

Химическое изнашивание инструментов при резании ВПКМ связано с химическими реакциями инструментального материала при его контакте с кислородом воздуха и веществами обрабатываемого материала, а также образованием на поверхности лезвия более мягких или хрупких соединений, которые легко удаляются с поверхности лезвия в процессе трения. В зависимости от режима резания и свойств обрабатываемого материала (типа волокон и их состава, метода армирования и т.п.) некоторые из этих механизмов могут играть доминирующую роль и определять интенсивность изнашивания инструмента в целом.

Развитие износа по задней поверхности при резании ВПКМ происходит во времени с переменной интенсивностью и может быть, как и при резании металлов, разделено на три периода [104]:

1) ***период приработки.*** В этот период наблюдается высокая интенсивность изнашивания. Основными причинами изменения формы лезвия являются или выкрашивания, или сколы как микровыступов на рабочих участках поверхностей лезвия, так и режущего клина, особенно при $\rho \to 0$. В начальном периоде работы лезвия микровыступы на его рабочих поверхностях и новые режущие кромки, имея малый радиус округления $\rho$, воспринимают силы резания по относительно малой площади контакта со стружкой, вследствие чего возникают чрезвычайно высокие контактные давления, что, в свою очередь, приводит к их механическому разрушению и, естественно, к высокой интенсивности изнашивания лезвия в це-

лом. В конце периода приработки контактные давления снижаются за счет увеличения площади контакта между лезвием инструмента и поверхностями на обрабатываемой заготовке и некоторого увеличения радиуса округления режущей кромки. Площадка износа достигает своей первой критической величины, что приводит к некоторому снижению и стабилизации интенсивности изнашивания;

2) ***период установившегося износа.*** В течение всего этого периода интенсивность изнашивания остается практически неизменной, хотя площадка износа хоть и медленно, но все-таки увеличивается, что сопровождается увеличением работы трения, а, следовательно, и мощности тепловых потоков. В конце этого периода износ по задней поверхности достигает второй критической величины, что приводит к некоторому росту силы и температуры резания;
3) ***период катастрофического износа***. Этот период характеризуется резким увеличением величины площадки износа за счет комбинированного влияния теплового разупрочнения материалов заготовки и инструмента и увеличения контактного давления, что сопровождается увеличением интенсивности изнашивания.

### 3.2.3. Критерии износа и стойкость инструмента при резании ВПКМ

К сожалению, в настоящее время пока еще нет никаких официальных документов и конкретных рекомендаций по критериям износа при обработке ВПКМ [71]. На практике при обработке ВПКМ чаще всего, как и при обработке металлов, нормируется величина фаски износа на задней поверхности. Ее величина ограничивается $h_з = 0{,}2$ мм, что по крайней мере в 1,5 раза меньше, чем при обработке металлов, когда рекомендуемая величина износа устанавливается $h_з \geq 0{,}3$ мм.

Одним из критериев износа при обработке ВПКМ может служить радиус округления режущей кромки $\rho$ [47].W. Reimann [105] исследовал влияние различных величин радиуса округления режущих кромок $\rho$ на расслоение и качество обработанной поверхности при высокоскоростном фрезеровании углепластика и определил, что резание инструментом с $\rho \geq 50$ мкм приводит к очень плохому качеству обработанной поверхности при том, что сила резания, если $\rho \geq 60$ мкм, практически не зависит от $\rho$. A. Fazar et al. [47] наблюдали аналогичное поведение крутящего момента при сверлении различными инструментами

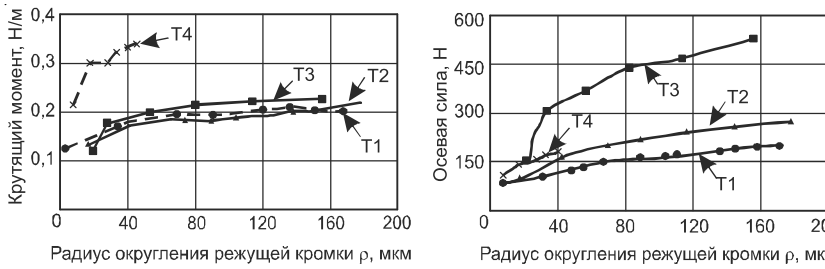



**Рис. 3.16.** Влияние радиуса округления режущей кромки на крутящий момент (а) и осевую силу (б) при сверлении углепластика [47] твердосплавными сверлами диаметром 4 мм: Т1 – спиральное сверло с двухплоскостной заточкой задней поверхности; Т2 – трехперое спиральное сверло с двухплоскостной заточкой задней поверхности; Т3 – трехперое спиральное сверло со спиральной заточкой задней поверхности; Т4 – комбинированное «сверло-развертка»

углепластика (рис. 3.16). Вместе с тем величина осевой силы в их опытах не была постоянной, что связано с увеличением силы трения между инструментом и боковой (обработанной) поверхностью отверстия.

Использование этого критерия для оценки работоспособности инструментов в реальном производстве затруднено, так как требует для его измерения специальных методик и приборов, например, электронного микроскопа.

На практике для оценки работоспособности инструментов часто используют такие показатели, как их ресурс или стойкость.

Использование в качестве критерия работоспособности инструмента его ресурса тоже не всегда может быть приемлемым. Например, ресурс, выраженный количеством обработанных данным сверлом отверстий при заданных условиях обработки хоть и является экономически информативной характеристикой инструмента, однако ограничен конкретной операцией.

Более универсальной характеристикой, позволяющей сравнивать различные инструменты и условия обработки, является стойкость. Некоторые эмпирические зависимости стойкости инструментов от скорости резания при обработке ВПКМ можно найти, например, в работе [71]. Стойкость инструмента зависит от геометрических параметров режущего инструмента (передний $\gamma$ и задний $\alpha$ углы) и режима резания (скорости резания $V$, подачи $S$ и глубины резания $t$). Влия-

ние геометрических параметров инструмента на его стойкость обусловлено их влиянием на интенсивность изнашивания, силу резания и прочность режущей кромки. Следует учитывать то обстоятельство, что, чем больше передний и задний угол, тем меньше сила резания и, следовательно, меньше интенсивность изнашивания. Но это же изменение указанных углов делает режущую кромку менее прочной и, следовательно, увеличивает интенсивность изнашивания из-за возрастания вероятности механического разрушения режущего клина (сколов, выкрашиваний и т.п.). Поэтому с точки зрения обеспечения максимальной для заданных условий обработки стойкости инструмента существуют оптимальные значения величин $\gamma$ и $\alpha$, которые могут быть определены для каждого конкретного случая экспериментальными или расчетными методами.

## Выводы

Исходя из изложенного, можно сделать выводы:

1. Анизотропия свойства ВПКМ вследствие слоистости структуры по сравнению с металлическими материалами существенно изменяет процесс стружкообразования при резании.
2. Процесс стружкообразования при резании ВПКМ в значительной степени определяется направлением волокнистого наполнителя в отдельных слоях и в меньшей степени от переднего угла.
3. В зависимости от направления волокнистого наполнителя и переднего угла при резании ВПКМ формируется пять видов стружки: стружка расслаивания, стружка продольного изгиба, стружка, формируемая срезанием волокон, и стружка макроразрыва.
4. Абразивное воздействие волокна на режущий инструмент является основной причиной довольно низких по сравнению с конструкционными сталями скоростей резания и обусловливает необходимость применение твердых сплавов, в т.ч. и с износостойкими покрытиями.
5. Склонность слоистых ВПКМ к расслаиванию требует особых мер по предупреждению их разрушения под действием сил резания. Направления сил резания должны быть, по возможности, такими, чтобы они способствовали сжатию между собой слоев ВПКМ. Толщина среза на выходе инструмента из обрабатываемого материала должна быть максимальной. Нельзя допускать повышенного

износа инструмента, так как это может привести к резкому увеличению сил резания.

6. Возникающая при резании композитов элементная стружка (тип IV) имеет значительный удельный объем и содержит большое количество пыли. Для удаления стружки из зоны резания при обработке отверстий (сверлами, зенкерами, метчиками и др.) требуется большая площадь сечения канавок и малая шероховатость их рабочих поверхностей.
7. Повышенная упругость КМ приводит к значительному упругому восстановлению обработанной поверхности. Это, в свою очередь, вызывает увеличение площади контакта по задней поверхности лезвия инструмента с изделием и рост сил трения, а также приводит к уменьшению диаметра отверстий при их обработке осевым инструментом (сверлении, зенкеровании, развертывании), нарезании резьбы метчиками и др. Поэтому режущие инструменты должны иметь увеличенные задние углы, а у мерных инструментов (разверток, метчиков и др.) диаметр должен быть больше диаметра формируемого отверстия.

РАЗДЕЛ 4

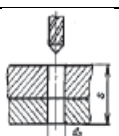
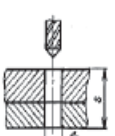
# Технологические особенности обработки отверстий при сборке авиационных конструкций

## 4.1. Общая характеристика технологических процессов выполнения болтовых и заклепочных соединений

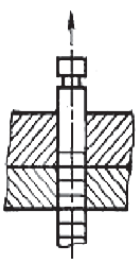
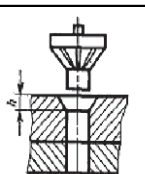
Технологический процесс сборки авиационных конструкций включает в себя большое количество разнородных операций. Значительную их долю составляют операции изготовления отверстий. Так, в табл. 4.1 приведен типовой технологический процесс выполнения потайного негерметичного соединения деталей при помощи ручных инструментов [3]. Содержание технологического процесса выполнения соединения (сборки) и последовательность операций в этом процессе зависят от типа соединительных элементов (заклепка, болт, болт-заклепка и др.), метода сборки (вручную или механически, втягиванием, забиванием, прессованием и т.п.), способа герметизации шва, доступности места постановки заклепки, габаритов и формы соединяемых деталей и других факторов. Например, ограниченный доступ к местам постановки заклепок хоть и не является относительно большой проблемой при сборке, но требует применения специальных приспособлений. Большие габариты соединяемых деталей усложняют их установку в приспособлениях [4].

В зависимости от сочетания материалов, толщины пакета, типа оборудования и инструмента отверстия под заклепки выполняют либо за один переход, либо за два перехода путем сверления отверстий. Для обычных стержневых заклепок отверстия образуют пробивкой или сверлением с шероховатостью поверхности Ra12,5–Ra6,3 мкм и диаметром отверстия на 0,1–0,2 мм больше диаметра заклепки. Для заклепок с высоким сопротивлением срезу применяются переходная

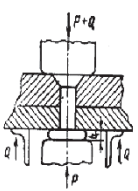
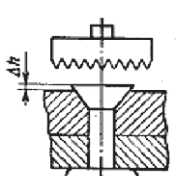
**Таблица 4.1.** Типовой технологический процесс выполнения потайного негерметичного соединения деталей с помощью ручных инструментов [3]

| Операция | Способ выполнения операции | Вид соединительного элемента | | | | Состав пакета | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | обычные заклепки | потайные заклепки | болт-заклепки с натягом | болты с натягом | металлический однородный пакет | ВПКМ однородный пакет | смешанный пакет |
| Сборка, регулировка и обжатие пакета | Обжатие с помощью технологических винтов или приспособлений | + | + | + | + | + | + | + |
| Изготовление направляющих отверстий  | Прошивка | + | + | + | + | + | – | – |
| | Сверление | | | | | + | + | + |
| Разборка пакета | | | | | | – | – | + |
| Обработка предварительных отверстий под заклепку или болт в каждой детали отдельно  | Прошивка | | | | | – | – | + |
| | Сверление | | | | | – | – | + |
| Сборка пакета | | | | | | – | – | + |

**Продовження табл. 4.1**

| Операция | | Способ выполнения операции | Вид соединительного элемента | | | | Состав пакета | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | обычные заклепки | потайные заклепки | болт-заклепки с натягом | болты с натягом | металлический однородный пакет | ВПКМ однородный пакет | смешанный пакет |
| Доводка отверстия до требуемого квалитета и шероховатости поверхности |  | Сверление/ рассверливание | – | – | + | + | + | + | + |
| | | Растачивание | | | | | + | + | + |
| | | Зенкерование | | | | | + | + | + |
| | | Развертывание | | | | | + | + | + |
| | | Протягивание | | | | | + | | + |
| | | Раскатывание | | | | | + | | - |
| | | Дорнование | | | | | + | | - |
| Изготовление гнезда под головки потайных заклепки или болта |  | Зенкование | – | + | + | + | + | + | + |
| | | Штамповка | | | | | + | - | + |
| Разборка пакета, промывка, удаление заусенцев | | | + | + | + | + | + | + | + |
| Сборка | | | + | + | + | + | + | + | + |

**Продовження табл. 4.1**

| Операция | | Способ выполнения операции | Вид соединительного элемента | | | | Состав пакета | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | обычные заклепки | потайные заклепки | болт-заклепки с натягом | болты с натягом | металлический однородный пакет | ВПКМ однородный пакет | смешанный пакет |
| Вставка заклепки или болта в отверстие с зазором или постановка заклепки или болта в отверстие с натягом | | Вручную или механически, втягиванием, забиванием | + | + | + | + | + | + | + |
| Изготовление замыкающей головки заклепки высотой $h_г$ или завинчивание гайки и контровка |  | Ударом, прессованием, вручную или механически | + | + | + | + | + | + | + |
| Снятие путем механической обработки излишнего материала для получения требуемой величины выступания |  | Зачисткой, фрезерованием, покрытием грунтом | + | + | + | + | + | + | + |

посадка или посадка с натягом стержня в отверстии, поэтому обработка таких отверстий осуществляется в два перехода – сверление направляющего отверстия с последующим зенкерованием, развертыванием или протягиванием [3].

Изготовление отверстий под болт или болт-заклепку осуществляют за несколько переходов сверлением отверстий с последующим их развертыванием для обеспечения требуемого качества обработанной поверхности.

Изготовление потайных гнезд для заклепок или болтов выполняют зенкерованием [16]. В некоторых конструкциях пакетов ВПКМ/металл заклепки (болты) устанавливаются с зазором в композиционном материале и с натягом в металле для повышения усталостной долговечности металла. В этом случае отверстие выполняется в пакете предварительно с определенным припуском. После этого пакет разбирается и отверстия в ВПКМ и металле обрабатываются (зенкеруются, развертываются, протягиваются, раскатываются и т.п.) отдельно разными инструментами. Затем детали собираются окончательно [4].

Штамповка потайных гнезд для заклепок в термореактивных стеклопластиках и углепластиках не допускается из-за невозможности осуществления пластических деформаций ВПКМ как в холодном, так и в нагретом состоянии [16].

При раздельном выполнении операций качество работы зависит от состояния оборудования и квалификации исполнителей. При таком методе работы контроль качества происходит после каждой операции. При автоматическом изготовлении отверстий и клепке выполнение отдельных операций и переходов контролируется при наладке-настройке автомата. Независимо от того, как производится процесс клепки, соединение контролируют в законченном виде.

Каждая из операций процесса соединения выполняется в сборочном приспособлении или на специальном рабочем месте – станке, прессе. При автоматической клепке все операции осуществляются на одном клепальном автомате. Для изготовления отверстий могут применяться различные дрели, в том числе ручные, с механической подачей, а также автоматизированные устройства для сверления и клепки.

Базирование при сборке может осуществляться:

- по месту, то есть непосредственно в изделии;
- по разметке на соединяемых элементах изделия;
- по сборочным отверстиям;
- по координатно-фиксирующим отверстиям.

Каждый из этих способов может быть применен только в случае, если он обеспечивает заданную определенность базирования устанавливаемого элемента. Большое влияние на возможность применения какого-либо способа базирования оказывает характер пространственной взаимосвязи устанавливаемого элемента относительно всех сопрягаемых с ним базовых элементов.

## 4.2. Технологические особенности обработки отверстий под болты и заклепки

В зависимости от требований к точности и другим характеристикам отверстий для их изготовления применяют комбинации сверления, зенкерования, протягивания, пробивки или прошивки, раскатывания, дорнования и др. Основными способами изготовления отверстий и гнезд в конструкциях из ВПКМ в настоящее время являются сверление, зенкерование и развертывание (см. разд. 1).

В табл. 4.2 на основе обобщенного опыта обработки отверстий в ВПКМ представлены стадии обработки отверстий в углепластиках. Для обработки отверстий до 12 мм экономически целесообразно применять монолитные (цельные) режущие инструменты (сверла, развертки, протяжки и др.). Для отверстий диаметром более 12 мм возможно применение как цельных, так и сборных инструментов, например, с механическим креплением режущей части (пластин или головок), а для отверстий диаметром более 18 мм рекомендуется применение только сборных инструментов.

В отличие от соединений металлов обработка отверстий в ВПКМ и пакетах с их применением требует в связи с многокомпонентной структурой и анизотропией свойств ВПКМ особых технологических приемов [27, 36, 106], в частности:

- для уменьшения повреждений обработанной поверхности (см. разд. 3, 5) – поддержания достаточной остроты режущей кромки, минимальных температуры и сил резания;
- для каждого конкретного материала должны быть выбраны оптимальные режимы резания и режущий инструмент вследствие существенного влияния на свойства ВПКМ не только его химического состава, но и технологии его производства;
- необходимо предотвращать перегрев и термическую деструкцию ВПКМ за счет выбора режима резания, конструкции инструмента и применения СОТС (см. п. 2.1.1);

**Таблица 4.2.** Возможные этапы обработки отверстий [107 и др.]

| Диаметр отверстия, мм | Квалитет | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 |
| | Шероховатость Ra, мкм | | | | | |
| | 80–40 | 40–20 | 20–10 | 10–5 | 5–2,5 | 2,5–1,25 |
| | Рекомендуемые стадии обработки | | | | | |
| от 3 до 12 | 1. Сверление МС | 1. Сверление МС НО<br>2. Зенкерование | 1. Сверление и рассверливание МС НО (до трех переходов)<br>2. Зенкерование | 1. Сверление и рассверливание МС НО (до трех переходов)<br>2. Развертывание | | 1. Сверление и рассверливание МС НО (до трех переходов)<br>2. Развертывание<br>3. Развертывание чистовое |
| от 12 до 20 | 1. Сверление СБ или обработка давлением | 1. Сверление МС НО<br>2. Сверление СБ<br>3. Зенкерование | 1. Сверление и рассверливание МС и СБ (до пяти переходов)<br>2. Зенкерование | 1. Сверление и рассверливание МС НО (до трех переходов)<br>2. Зенкерование (растачивание, развертывание) | | 1. Сверление и рассверливание МС НО (до трех переходов)<br>2. Зенкерование (растачивание)<br>3. Развертывание |

*Примечание*: МС – цельный инструмент; СБ – сборный инструмент; НО – направляющее отверстие. Для квалитетов 8–12 с целью сокращения количества переходов возможно применение комбинированных инструментов. При изготовлении отверстий 8 квалитета развертывание обязательно

- при сверлении без применения СОТС необходимо использовать приспособления для отвода стружки;
- необходимо исключать образование нароста на режущей кромке путем выбора режима резания, конструкции инструмента и применения СОТС (см. разд. 5, 6);
- необходимо увеличивать жесткость тонких слоев ВПКМ на выходе сверла путем применения опорной пластины либо путем сверления смешанного пакета со стороны слоя ВПКМ в слой металла;
- необходимо предусматривать обязательное удаление мусора из зоны изготовления отверстия с помощью жидкостей, которые легко испаряются;
- необходимо защищать электрические части машин от пыли, образовавшейся в процесс обработки углепластика, поскольку по причине высокой проводимости углеволокна может возникнуть короткое замыкание.

Обработка отверстий в смешанных пакетах ВПКМ/металл требует дополнительного внимания, связанного с тем, что свойства ВПКМ, титановых и алюминиевых сплавов принципиально различаются (см. раздел 1). В силу этого для обработки каждого из слоев оптимальные инструмент и режимы резания также существенно отличаются (см. раздел 5, 6) [108].

Особые сложности возникают при обработке отверстий в пакете ВПКМ/титановый сплав, для которого не рекомендуется использовать один и тот же инструмент для слоя из ВПКМ и слоя из титанового сплава. Традиционная технология предполагает первоначально обрабатывать отверстие до слоя из титанового сплава с использованием датчика глубины при относительно высоких скоростях резания и большой подаче. Затем необходимо заменить инструмент и, используя пониженные режимы резания, обработать отверстие в слое из титанового сплава. Для того чтобы гарантировать качество отверстия, окончательной операцией является развертывание одновременно двух слоев [108]. Например, сверление пакета «лист графитопласта /лист титана» (балка или ребро) предполагает три перехода [109]:

1) сверление отверстия сверлом из поликристаллического алмаза (ПКА) в слое графитопласта (до титанового слоя) с высокой скоростью резания и большой минутной подачей;
2) рассверливание отверстия в ВПКМ и сверление отверстия в титановом слое твердосплавным сверлом с относительно «мягкими» режимами резания;

3) развертывание отверстия и зенкование места под головку винта комбинированным инструментом, состоящим из твердосплавной развертки и зенкера из ПКА.

Другой пример описан в патенте WO 2006/120654 A2. Для обработки отверстия ∅7,9 мм со 100° фаской под головку винта в пакете Ti/Al/углепластик используется технология, описанная в табл. 4.3.

Таким образом, изготовление отверстий в смешанном пакете обладает значительной трудоемкостью и составляет большой удельный вес временных затрат (до 30%) в общей трудоемкости выполнения соединения [17]. Решением проблемы снижения трудоемкости изготовления отверстий при сборке в настоящее время является создание инструментальных материалов и/или осевых инструментов, обеспечивающих приемлемые экономические показатели обработки отверстий как в ВПКМ, так и в металлических (титановых, алюминиевых и др.) материалах (см. разд. 6), а также в применении систем автоматического регулирования скорости резания и подачи как в ручных машинах, так и станках, реализующих прерывистое сверление (см. разд. 7). Например, для обработки отверстий ВПКМ/алюминиевый сплав подходят инструменты на основе ПКА или с алмазным покрытием, которые могут обрабатывать оба слоя без замены инструмента. В этом случае и режим резания в обоих слоях может быть одинаковым [108]. Недавние исследования показывают, что использование комбинированного инструмента, каждая часть которого оптимизирована для обработки ВПКМ и титанового слоя, позволяет существенно снизить штучное время обработки отверстия за счет совмещения операций [110]. Однопроходные технологии обработки пакетов аэрокосмических

**Таблица 4.3.** Технология и время обработки отверстия ∅7,9 мм с фаской 50° под головку винта в пакете Ti/Al/углепластик

| Содержание перехода | Характеристика инструмента | Штучное время, мин |
|---|---|---|
| Сверление | Сверло ∅4,8 мм | 12 |
| Рассверливание | Сверло ∅6,3 мм | 10 |
| Рассверливание | Сверло ∅7,5 мм | 8 |
| Развертывание | Развертка ∅7,7 мм | 10 |
| Развертывание | Развертка ∅7,89 мм | 12 |
| Зенкование | Зенкер $2\varphi = 100°$ | 8 |
| Итого | | 60 |

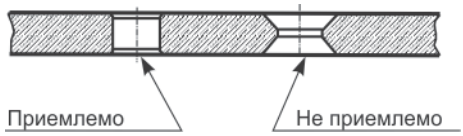



**Рис. 4.1.** Размеры фасок отверстий, формируемых для удаления заусенца [4]

материалов с помощью сверл специальных конструкций рассмотрены в работах [111], патентах WO 2006/120654 A2, US4898503, US5888036, US5967707, US7665935 и др.

После сверления всех отверстий детали разъединяются и выполняется удаление заусенцев. Заусенцы снимаются специальным инструментом или сверлом большего диаметра. Если заусенцы снимаются вручную, необходимо следить, чтобы не было увеличения отверстия. Важно также не делать чрезмерно большие фаски, чтобы не создать острую кромку в отверстии (рис. 4.1).

### 4.2.1. Формирование отверстий

Одной из первых операций является формирование отверстий в сплошном материале заданной формы. Эти предварительные отверстия имеют точность 12–14 квалитетов, выполняются, как правило, за один переход и в дальнейшем подвергается дополнительной обработке для увеличения их диаметра или повышения точности и качества их поверхности или используются без дополнительной обработки в соединениях, не требующих высокой точности, например, заклепочных.

Изготовление предварительных отверстий может быть выполнено обработкой давлением (вырубкой, пробивкой, штамповкой) или сверлением (см. разд. 1).

Обработка отверстий давлением хоть и является высокопроизводительным процессом, но для однородных и смешанных пакетов из ВПКМ, а также на этапе окончательной сборки агрегатов применяется редко. Причиной этому является возможное появление выпучиваний и наклепа материала деталей вокруг стенок отверстия, образование трещин, рваных краев и разлохмачивания, что требует введения дополнительных операций зачистки. Поэтому обычно обработку давлением применяют только для изготовления сборочных или направ-

ляющих отверстий, диаметр которых существенно меньше номинального диаметра [3].

Необходимо иметь в виду, что при изготовлении отверстий в деталях из некоторых ВКПМ вследствие особенностей разрушения материала в процессе формирования отверстия путем силового деформирования вновь образующаяся поверхность, как правило, получается неровной и около отверстия могут образовываться трещины и ореолы, что является совершенно недопустимым, например, для болтовых и клепаных соединений, работающих в условиях циклических нагрузок. Поэтому, если в подобных случаях и формируют отверстия путем пробивки, то следует дополнительно применять операцию зачистки, осуществляемую с помощью специальных (зачистных) штампов. Размер припуска под зачистку зависит от толщины и марки ВПКМ [3].

Пробивку отверстий в стеклопластиках и углепластиках можно осуществлять в обычных, инструментальных, одиночных и групповых штампах, используемых для пробивки отверстий в металлах. В этом случае необходимо назначить исполнительные размеры инструмента с учетом усадки, возникающей при пробивке стеклопластиков и углепластиков [16].

Сверление позволяет получить отверстия более высокого качества, чем ранее рассмотренные способы, гарантирует большую точность и более высокое качество. Сверление, пожалуй, единственный способ, который в условиях сборочного производства гарантированно обеспечивает получение отверстия в однородных и смешанных пакетах 12–14 квалитета точности с приемлемым уровнем повреждений. Часто сверление совмещают с зенкованием гнезда под потайные головки заклепок и болтов [17].

Режимы резания, оптимальные для обработки отверстия в каждом материале существенно различаются (табл. 4.4).

В однородных пакетах изготовление отверстий выполняется в собранном пакете, а в смешанных пакетах ВПКМ/металл – как в собранном пакете, так и раздельно. Причем при выполнении соединений смешанных пакетов количество операций сборки/разборки больше, чем при сборке однородных пакетов. Например, при сверлении смешанных пакетов алюминия, титана и ВПКМ изготавливают направляющее отверстие с последующей разборкой соединения и выполнения отверстия в каждом элементе изделия отдельно.

Отверстие с заданным размером может быть выполнено только, если металлический лист является граничным. Во всех других случаях следует

**Таблица 4.4.** Параметры сверл и режимы резания при сверлении отверстий в различных материалах [3, 16, а также разд. 3, 6]

| Параметр сверла и режим резания | | Алюминиевые сплавы | Сталь углеродистая | Сталь хромансилевая | Титановые сплавы | ВПКМ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Угол при вершине, градус | | 90–118 | 118 | 135 | 140 | 90, 125–130 |
| Передний угол, ° | | 0–40° | 30° | | 5–15° | 0–10 |
| Задний угол, ° | | 6–10° | 12–16° | | 5–10° | 5–20 |
| Материал | | БР, ТС | | БР, ТС | | ТС |
| Покрытие | | TiAlN, алмазное | TiAlN | TiAlN | TiN, TiCN, алмазное | алмазное |
| Тип | | Спиральное с нормальной заточкой | | Спиральное с двойной заточкой | | Спиральное со специальной заточкой |
| Отверстие диаметром до 5 мм | скорость резания, м/мин | 25–60 | 30–45 | 15–20 | 10–15 | 40–60 |
| | подача, мм/об | 0,1–0,15 | 0,06–0,08 | 0,04–0,06 | 0,03–0,05 | 0,02–0,05 |
| | частота вращения, об/мин | 3500 | 2000–3000 | 1000–1500 | 500–800 | 2500–3500 |
| Отверстие диаметром до 10 мм | скорость резания, м/мин | 25–60 | 20–30 | 10–15 | 8–10 | 40–60 |
| | подача, мм/об | 0,2–0,3 | 0,13–0,15 | 0,10–0,12 | 0,5–0,1 | 0,02–0,05 |
| | частота вращения, об/мин | 2000–3000 | 1000–1500 | 500–800 | 250–400 | 1500–3000 |

использовать системы сверления с адаптивным управлением подачей и скоростью резания, обеспечивающие адаптацию режимов резания для каждого материала в отдельности (рис. 4.2). В последние годы путем совершенствования режущего инструмента стало возможным повышение качества отверстий, выполненных в смешанном пакете. Это достижение обозначило тенденцию изготовления отверстий непосредственно в смешанном пакете без его предварительной разборки.

Основное требование к отверстиям – это прямолинейность оси отверстия и ее перпендикулярность к плоскости, касательной к внешней поверхности соединяемых деталей. Овальность отверстия допускается только в пределах допуска на диаметр отверстия.

Необходимо выдерживать также определенное расстояние от края детали до образующей отверстия. Если это не оговорено непосред-

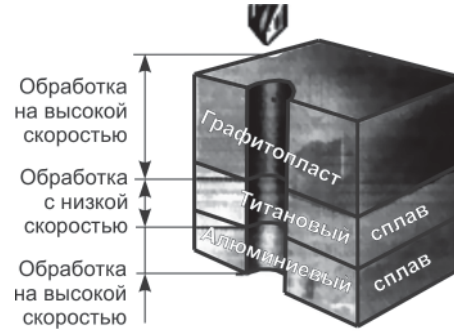



**Рис. 4.2.** Схема изменения режима резания при сверлении смешанного пакета [15]

ственно в чертеже, то минимальное расстояние от образующей отверстия до края детали равняется: металлической – одному диаметру отверстия [3]; из ВПКМ 2–3 диаметрам отверстия [4].

Ориентирование инструмента при сверлении отверстий диаметром до 16 мм производится с помощью поддерживающих сборочных зажимных устройств (СЗУ), по кондуктору, без кондуктора со стороны каркаса по направляющим отверстиям, со стороны обводов с помощью треног, призм, угольников, обеспечивающих перпендикулярность оси сверления опорной плоскости пакета [17]. Сверление однородных или смешанных пакетов, содержащих ВПКМ, осуществляют по направляющим отверстиям в металлических деталях, входящих в пакет, или по кондуктору. Сверлить по разметке разрешается в виде исключения в местах, недоступных для установки кондуктора, и в случае если невозможно изготовить направляющие отверстий [16].

Для снижения вибраций и отклонений при сверлении быстрорежущими сверлами применяются кондукторные втулки. Более жесткие цельные твердосплавные сверла вызывают меньшие вибрации и отклонения. Это свойство цельных твердосплавных сверл обычно исключает необходимость применения кондукторных втулок. Короткие твердосплавные сверла всегда используются на станках с ЧПУ без кондукторных втулок. Кондукторные втулки для длинных цельных твердосплавных сверл обычно не применяются, поскольку любое смещение сверла приводит в этом случае к его поломке. Для обработки глубоких отверстий используют сверла с твердосплавными головками или с твердосплавными пластинами [112].

Следует обратить внимание на тот факт, что при сверлении тонких пакетов с ручной подачей инструмента чрезмерное снижение осевой силы за счет уменьшения главного угла в плане приводит

к формированию отверстий «проткнутого» типа. Поэтому при сверлении дрелями и на станках с ручной подачей инструмента нецелесообразно принимать главный угол в плане $2\varphi < 100–120^\circ$ [16].

Для устранения попадания стружки между соединяемыми деталями перед сверлением и зенкерованием необходимо обеспечить полное прилегание их контактных поверхностей с помощью специальных прижимов, предусмотренных в сборочном приспособлении. Для натяжения различного рода обшивок могут применяться амортизаторы с тендерами [16]. Чтобы пакет был жестким и плотно сжатым, устанавливают средства временного крепления в виде пружинных фиксаторов, технологических болтов или заклепок. Пружинные фиксаторы рекомендуется применять при толщине пакета до 4 мм, а технологические болты в пакетах – при толщине пакета свыше 4 мм. В пакетах, не требующих промежуточной разборки, вместо средств временного крепления рекомендуется ставить контрольные заклепки, которые должны быть предусмотрены чертежом на изделие. Фиксаторы, технологические болты или контрольные заклепки устанавливают в зависимости от жесткости элементов конструкции с шагом не более 150 мм [16].

Практический опыт показал, что эффект «усадки» отверстий (см. п. 2.2.2) наблюдается только при сверлении по кондуктору или при обычном сверлении через накладки. Вследствие «разбивки» отверстий при сверлении без кондуктора диаметр отверстия всегда больше диаметра сверла. Поэтому при сверлении по кондуктору диаметр сверла необходимо выбирать на 0,1–0,2 мм больше номинальной величины диаметра заклепки, а при сверлении без кондуктора – меньше на 0,1 мм [16].

Сверление может производиться на сверлильных станках, специализированных полуавтоматических установках на базе сверлильно-зенкеровальных агрегатов, сверлильно-зенкеровальных устройств, сверлильно-зенкеровальных встраиваемых в сборочную оснастку устройств (СЗВУ), а также ручным механизированным инструментом (сверлильные машины, дрели, разделочные устройства) [17].

Тип оборудования выбирается в зависимости от формы и размеров узлов, агрегатов, диаметра отверстий, требований к точности и доступности места обработки, рекомендуемых режимов резания и сочетания материалов в пакете [16, 17].

### 4.2.1.1. Ручное сверление

При выполнении сверления с помощью ручных сверлильных машин (дрелей) тяжело обеспечить малое отклонение размера отверстия. При ручном сверлении возможно управление только частотой вращения сверла. При таком способе сверления качество отверстия зависит главным образом от рабочего. Он должен обеспечить такое прикладываемое к ручной сверлильной машине усилие, которое было бы достаточным для изготовления отверстия, но при этом исключало его повреждение.

Очевидно, ручное сверление является не лучшим способом обработки отверстий, но оно все-таки достаточно часто используется, так как не требует приспособлений, и особенно в тех случаях, когда доступ к месту обработки отверстия ограничен (рис. 4.3). Для труднодоступных мест могут использоваться угловые дрели. В случае свободного сверления рекомендуется, чтобы операторы использовали кондукторные втулки или опоры, повышающие точность направления, и при этом были бы снабжены подробными письменными инструкциями по выполнению и контролю данной технологической операции изготовления отверстия [4].

Ручное сверление при сборке часто выполняется для изготовления направляющих отверстий, а также отверстий под временный крепеж для обжатия пакетов. Эти отверстия в дальнейшем (в конце сборки) рассверливаются до нормального размера. Направляющие отверстия обычно выполняются сверлами малого диаметра (2–4 мм). Конструктивные отверстия, выполняемые в пакетах ВПКМ/металл, имеют обычно диаметр 4–10 мм. В этом диапазоне преимущество отдается отверстиям диаметром 5–6 мм.

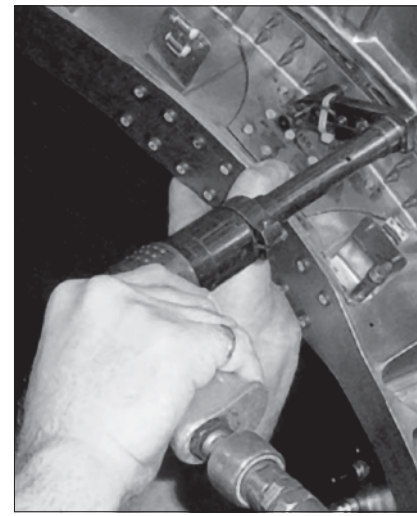


**Рис. 4.3.** Работа в зоне ограниченного доступа [4]

Сверление на станках с «ручной» подачей и пневмодрелями пакетов из различных ВПКМ и пакетов ВПКМ/металл, имеющих двусторонний доступ, рекомендуется осуществлять за два перехода. Первый переход выполняется с более прочной и большей по толщине стороны. На втором проходе рассверливается:

1) для пакетов из ВПКМ – со стороны «тонкой» детали;
2) для пакетов ВПКМ/металл – со стороны ВПКМ, так как при сверлении отверстий со стороны металла отверстия в детали из ВПКМ будут иметь, как правило, рваные края (выкрашивания) и значительную ворсистость.

Ворсистости и выкрашивания кромок отверстий можно избежать путем пакетной обработки сразу нескольких деталей с помощью специальной оснастки, обеспечивающей жесткий прижим материала по кромке отверстия. Аналогичный эффект получают при использовании специальных прокладок из фибры и фанеры, удаляемых после изготовления отверстий [16].

Скорость резания при ручном сверлении зависит от свойств материала и толщины листов. Чем толще и тверже материал, тем скорость резания должна быть меньше [4]. Режим резания при сверлении смешанных пакетов с металлическими слоями (например, ВПКМ/металл, ВПКМ/металл/металл или некая другая комбинация, ВПКМ с металлами), как правило, определяется режимом сверления металлических слоев, состоящих из наиболее прочных, или твердых, или труднообрабатываемых материалов. Например, при сверлении пакета углепластик/алюминиевый сплав можно использовать частоту вращения 2000–3000 об/мин с подачей примерно 0,025–0,055 мм/об. В то же время при сверлении пакета углепластик/титановый и углепластик/алюминиевый сплав/титановый сплав допустимый режим резания устанавливается с использованием частоты вращения 300–400 об/мин и ручной подачи около 0,1–0,125 мм/об [11].

Таким образом, ручное сверление, которое достаточно эффективно позволяет обеспечить мобильность и возможность изготовления отверстий в труднодоступных местах, все-таки сопряжено со сложностями обеспечения требуемого усилия сверления, оптимальных режимов резания и, как следствие, требуемого качества отверстия.

#### 4.2.1.2. Сверление с механической подачей

Сверление с механической подачей предпочтительнее, чем ручное. При сверлении с механической подачей сверлильная машина закрепляется в приспособлении, что обеспечивает точность ее позиционирования и перпендикулярность оси. Сверлильная машина, как правило, должна иметь возможность обеспечения процесса регулирования не только частоты вращения, но и подачи [4]. Практическая реализация именно этих особенностей сверления с механической подачей обеспечивает обработку отверстий диаметром 5–12 мм в пакетах ВПКМ/титановый сплав с точностью 11–12 квалитетов [113].

Некоторые сверлильные машины могут реализовывать прерывистое сверление (см. разд. 8). Это способствует повышению качества отверстия, особенно при сверлении смешанных пакетов ВПКМ/металл. Например, в работе [4] представлен типичный цикл прерывистого сверления отверстия 4,76 мм в пакете ВПКМ/титановый сплав, выполняемый с частотой 550 об/мин и подачей 0,005–0,01 мм/об и в пределах глубины 25,4 мм с 30–60 отводами сверла.

Таким образом, сверление с механической подачей с помощью сверлильных машин обеспечивает достаточную точность позиционирования и перпендикулярности оси за счет закрепления сверлильных машин в приспособлении, а также регулировку режимов резания в процессе сверления, однако требует для своего практического применения значительно большего пространства и лучшей доступности к месту выполнения операции.

### 4.2.2. Изготовление гнезд под потайную головку

Изготовление гнезд под головки потайных заклепок – очень ответственная операция. Гнезда под головки потайных заклепок могут быть получены различными способами [1, 17]: зенкованием, штамповкой или комбинацией зенкования и штамповки (рис. 4.4).

Формирование гнезда под потайную головку штамповкой в условиях сборочного производства реализуется достаточно сложно. В зависимости от толщины деталей, входящих в пакет, отверстие штампуют отдельно в каждой детали или совместно в двух или трех деталях при помощи пуансона и матрицы. В тонком пластичном материале штамповка гнезд выполняется головками самих заклепок. Гнезда с углом конуса 120° штампуют специальным инструментом на прессах.

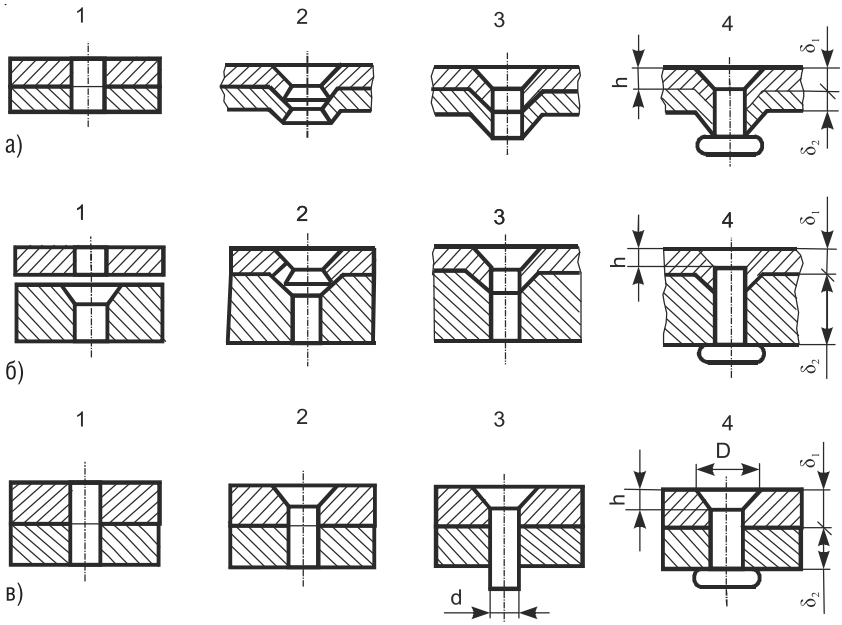



**Рис. 4.4.** Способы изготовления гнезд под головки потайных заклепок [3]

Перед штамповкой с помощью пуансона и матрицы в деталях сверлят предварительные отверстия (рис. 4.4а, поз. 1) диаметром, составляющим 0,8–0,9 диаметра заклепки. После сборки пакета отверстие рассверливают (рис. 4.4а, поз. 3) дополнительно к диаметру $d$ + (0,1–0,2) мм, где $d$ – диаметр заклепки. Если же гнездо штампуется головкой самой заклепки, то отверстие в пакете должно иметь номинальный диаметр [3].

Например, если толщина обшивки $\delta_1$ не больше 1 мм, а толщина детали каркаса $\delta_2$ больше высоты головки заклепки $h$, то гнезда под головки заклепок в каркасе зенкеруют (рис. 4.4б, поз. 1), а гнездо в обшивке получают штамповкой (рис. 4.4б, поз. 2) [3]. Аналогично поступают и в смешанных пакетах металл/ВПКМ (рис. 4.4б, поз. 3) [16].

Зенкование – наиболее производительный процесс получения гнезд под головки потайных заклепок (рис. 4.4в). Его применяют, если толщина наружной детали, например обшивки, не меньше высоты головки потайной заклепки (рис. 4.4в, поз. 4) [3]. В деталях из ВПКМ

после рис. 4.5 идет почему-то 4.7. Нужно перенумеровать!



зенкование является единственным способом для формирования гнезд из-за хрупкости матрицы [16].

Минимальная толщина листа ВПКМ, допускающая зенкование в них гнезд, зависит от размерных параметров заклепок и болтов и должна быть больше высоты потайной головки заклепки или болта на 0,3–0,8 мм в зависимости от диаметра крепежного элемента, но не меньше 20% толщины листа. Какой из этих параметров больше, тот и должен быть принят при зенковании (рис. 4.5) [4, 15, 16]. Следует учитывать, что выполнить требования по зенкованию гнезд под потайные головки в ВПКМ достаточно сложно. В этой связи предпочтительным является использование ВПКМ для внутренних элементов, где зенкование не требуется [5].

Зенкование выполняется двумя способами – одновременно со сверлением или отдельной операцией (см. разд. 6). Зенкование гнезд отдельной операцией выполняют зенковками с направляющим штифтом или сверлом [17]. Диаметры направляющих штифтов примерно на 0,1 мм меньше номинального диаметра отверстия. Зенкование с одновременным сверлением и/или развертыванием (комбинированным инструментом (см. раздел 6)) занимает меньше времени и обеспечивает получение гнезда более высокого качества, чем при раздельном сверлении и зенковании. Эта операция может выполняться по разметке или по программе на станках с ЧПУ и сверлильно-зенковальных установках, по направляющим отверстиям (зенкование как с одновременным сверлением, так и развертыванием) [16, 17]. При зенковании применяют то же оборудование и ручной механизированный инструмент, что и при сверлении [16]. Обработка мест под головки винтов, фаски и скругления может быть выполнена с тыльной стороны отверстия с помощью специальной зенковки, режущая часть

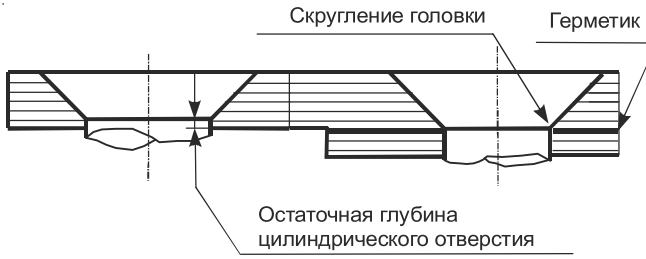



**Рис. 4.5.** Зенкование конусных гнезд [4]

которого прячется в державку при включении обратного вращения шпинделя [114].

Зенкование ВПКМ подобно зенкованию металлов за исключением двух отличий:

1) глубину зенкования нужно выбирать таким образом, чтобы предотвратить появление тонкого ребра в тонком листе;
2) радиус сопряжения «конус-цилиндр» должен быть равен радиусу между головкой и цилиндрической частью (стержнем) винта или заклепки.

Из-за низкой межслоевой прочности ВПКМ невыполнение любого из этих условий может привести к трещинам и расслаиванию при сборке [4]. Глубина зенкования ограничивается прочностью на смятие, потому что большинство нагрузок передается цилиндрической частью болта или заклепки. Во время зенкерования для главных крепежных деталей с потайной головкой важно не зенковать слишком глубоко, чтобы не создавалось тонкое ребро в элементе, в котором формируется гнездо под потайную головку. Наибольшая глубина гнезда должна быть меньше минимальной высоты (по нормали) головки заклепки на 0,05 мм. Тонкое ребро создает существенное повышение напряжений, а также позволяет крепежной детали выйти за поверхность зенкуемого гнезда, что приводит к снижению прочности и усталостной долговечности изделия.

Наименьшую глубину гнезд устанавливают согласно техническим условиям на величину выступа головок заклепок относительно поверхности деталей из ВПКМ после клепки (табл. 4.9). При этом не допускаются расслаивание, трещины и распушивание отверстий и гнезд [16].

**Таблица 4.9.** Допускаемые размеры выступов головки потайных заклепок относительно поверхности детали из ВПКМ [16]

| Вид шва | Размеры выступов головки заклепок, мм | | |
|---|---|---|---|
| Потайной: | | | |
| - до клепки | 0,13 | 0,23 | 0,3 |
| - после клепки | 0,05 | 0,10 | 0,15 |
| Двусторонний потайной: | | | |
| - до клепки | 0,18 | 0,28 | 0,35 |
| - после клепки | 0,05 | 0,10 | 0,15 |

## 4.2.3. Окончательная обработка отверстий

### 4.2.3.1. Зенкерование

Зенкерование преимущественно применяется для окончательной обработки отверстий 11–12 квалитета точности за счет повышения точности предварительно просверленных отверстий, в том числе и отверстий со ступенькой, образующейся в пакете в процессе установки деталей в сборочное положение [17].

Для зенкерования используют зенкеры и комбинированные инструменты, например, сверло-зенкер. Зенкеры имеют три-четыре главные режущие кромки. Поэтому процесс резания при зенкеровании проходит более производительно и устойчиво, чем сверление. Зенкерование применяют для увеличения диаметра предварительно просверленного отверстия, поэтому осевая сила меньше из-за отсутствия силы, действующей на перемычке, а шероховатость обработанной поверхности примерно вдвое меньше, чем при сверлении с той же подачей, благодаря большему количеству режущих кромок [17].

Зенкерование может быть прямым и обратным. При прямом зенкеровании с целью повышения точности применяются специальные зенкеры с направляющей [17]. Совместную обработку отверстий после установки деталей в сборочное положение при несовпадении осей раздельно подготовленных предварительных отверстий выполняют специальным зенкером, используя отверстие с большим диаметром в качестве направляющего отверстия [17].

Обратное зенкерование отверстий выполняется специальными насадными зенкерами. Базирование зенкера осуществляется по обрабатываемому отверстию посредством сменных направляющих втулок, устанавливаемых на шпиндель сверлильной машины [17].

В качестве СОЖ при зенкеровании отверстий в деталях из ВКПМ чаще всего применяют смазку МР-4 или индустриальное масло И-40А [17].

### 4.2.3.2. Развертывание

Когда требуется изготовить отверстия точнее 10-го квалитета, применяется окончательная обработка развертыванием. Ручное развертывание с целью обеспечения спокойных условий резания осуществляется, как правило, с малым припуском (0,02–0,20 мм) и небольшими подачами (0,1–0,5 мм/об), хотя подачи по существующим рекомендациям,

обеспечивающим максимальную стойкость разверток, должны быть несколько большими. Так как режущие кромки развертки (главные и вспомогательные) составляют, как правило, относительно небольшой угол с осью образующегося отверстия (угол подъема винтовой линии $\lambda = 0–8°$), стружка при развертывании образуется в условиях, подобных условиям стружкообразования при прямоугольном резании. При этом может быть получена шероховатость обработанной поверхности в пределах Ra 0,4–5 мкм, а размерная точность отверстий – в пределах 7–8-го квалитетов. Применение ручного развертывания допустимо в случаях, когда подходы к конструкции не позволяют использовать механизированное развертывание.

Операция механизированного развертывания применяется для окончательной обработки отверстий 7–9 квалитета точности в пакетах, включающих кроме ВПКМ стали, алюминиевые и титановые сплавы. Механизированным развертыванием обеспечивается обработка отверстий с диаметрами 4–45 мм в пакетах толщиной 8–225 мм, в том числе отверстий, расположенных в труднодоступных местах конструкции изделия.

Механизированным развертыванием обрабатывают предварительные отверстия, подготовленные с допусками по 12-му квалитету точности с припуском под окончательную обработку: 0,3–0,5 мм для отверстий диаметром 4–27 мм и 0,7 мм для отверстий диаметром 30–45 мм. Механизированное развертывание отверстий в смешанных пакетах осуществляют комплектом разверток, базирующихся по обрабатываемому отверстию без использования дополнительной направляющей оснастки (рис. 4.6).

Основные рекомендации при развертывании в условиях агрегатной сборки:

- малые отверстия диаметром до 4 мм обрабатывать специальными развертками;
- отверстия диаметром 6–12 мм и глубиной до 5d в пакетах из алюминиевых и титановых сплавов обрабатывать развертками по ОСТ 1 52485-86;
- большие отверстия диаметром 5–45 мм в пакетах, включающих титановые сплавы и стали средней прочности ($\sigma_в < 1100$ МПа), обрабатывать развертками из быстрорежущей стали;
- отверстия в пакетах, включающих титановые сплавы повышенной прочности и стали типа 14Х17Н2, обрабатывать развертками из быстрорежущей стали с низким содержанием вольфрама Р12Ф2К5М3, Р12Ф2К8М3, Р12Ф3К10МВ;

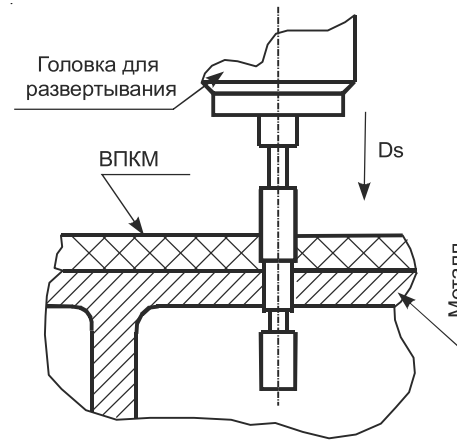



**Рис. 4.6**. Схема развертывания отверстия в пакете ВПКМ/металл [113]

- отверстия с диаметрами 14–45 мм в пакетах, включающих высокопрочные стали, обрабатывать твердосплавными развертками;
- отверстия 7 квалитета точности в смешанных пакетах из алюминиевых и титановых сплавов предпочтительно обрабатывать со стороны алюминиевого сплава;
- при выполнении технологического перехода развертывание осуществлять без промежуточных выводов развертки из отверстия;
- выводить развертку из отверстия во избежание повреждения обработанной поверхности в направлении рабочей подачи. Допускается при обработке отверстий в местах со стесненным или односторонним подходом плавно выводить развертку из обработанного отверстия по направлению, обратному направлению рабочей подачи, при пониженной частоте вращения шпинделя сверлильной машины.

Скорость резания при развертывании отверстий в пакетах из однородных материалов в пределах 4,8–9,6 м/мин обеспечивается частотой вращения шпинделя применяемых сверлильных машин. При обработке отверстий по седьмому квалитету точности в смешанных пакетах из алюминиевых, титановых сплавов и высокопрочных сталей скорость резания должна быть снижена до 1,0–1,9 м/мин для отверстий с диаметром до 12 мм и до 3,6–5 м/мин для отверстий с диаметрами 30–45 мм.

Следует иметь в виду, что при развертывании необходимо использовать СОЖ с превалирующим смазывающим действием (смазку МР-4 или индустриальное масло И-40А). В качестве специальной развертки может быть использована самоориентирующаяся (самоустанавливающаяся)

развертка. Для исключения влияния вибрации пневмоинструмента на работу развертки необходимо применять специальное шарнирное устройство – насадку.

Чтобы обеспечить требуемые точность и качество отверстий под болтовые соединения в смешанных пакетах с ВПКМ, также применяют развертывание отверстий. Использование разверток позволяет обработать отверстия диаметром 5–12 мм 7–9 квалитета точности. Достижимая шероховатость поверхности отверстия $Ra \leq 1{,}6$ мкм.

Развертывание можно осуществлять машинными и ручными развертками. Рекомендуется машинное развертывание использовать с ориентацией инструмента с помощью вращающихся кондукторных втулок. Могут быть использованы машинные развертки с задней или с задней и передней направляющими, выполненные из твердого сплава. Допускается также применение ручных быстрорежущих разверток стандартной конструкции, однако при этом следует учитывать их относительно низкую стойкость [16].

Критерием затупления является износ по задней поверхности, равный 0,08–0,1 мм. В целях компенсации «усадки» отверстий диаметр калибрующей части разверток для ВКПМ следует увеличивать на 0,01–0,02 мм по сравнению с диаметром калибрующей чести разверток для металлов.

При машинном развертывании отверстий в ВПКМ твердосплавными развертками рекомендуются следующие режимы резания [16]:

| | |
|---|---|
| Скорость резания $V$, м/мин | 20–40 |
| Подача $S$, мм/об | 0,1–0,6 |
| Глубина резания $t$, мм | 0,2–0,3 |

При увеличении подачи несколько увеличивается «усадка» отверстий. Поэтому изменением подачи можно регулировать размеры отверстий в пределах 10–20 мкм. Развертывание с малыми подачами не рекомендуется, так как при этом снижается точность отверстий, увеличиваются их овальность и конусность [16].

На точность отверстий влияют как способ обработки отверстий, так и сочетание материалов в пакете, причем в однородных пакетах точность отверстий несколько выше, чем в смешанных [16].

Использование нескольких сверл и разверток для обработки отверстий под болтовые соединения нецелесообразно, так как точность таких отверстий практически соответствует точности отверстий, полученных одним сверлом и одной разверткой и соответствуют 7–9-му квалитету точности [16].

### 4.2.3.3. Протягивание

Операция протягивания применяется для окончательной обработки отверстий 7–9 квалитетов точности в однородных пакетах из алюминиевых, титановых сплавов и сталей, а также отверстий 8–9 квалитетов точности в смешанных пакетах, включающих алюминиевые сплавы и стали. В смешанных пакетах, содержавших ВПКМ, протягиванием могут быть обработаны отверстия 9–10 квалитета точности. При протягивании возможно достижение шероховатости поверхности отверстия $Ra \leq 1{,}6$ мкм [113].

Протягиванием обеспечивается обработка отверстий с диаметрами 5–24 мм в пакетах толщиной 5–70 мм. Его целесообразно применять в зонах массового расположения отверстий при наличии свободных подходов в направлении оси отверстия.

Технологический процесс обработки точных отверстий протягиванием представляет собой снятие режущим инструментом – протяжкой определенного припуска металла с заранее подготовленного отверстия путем перемещения инструмента в продольном осевом направлении с вращением вокруг оси протяжки или без него.

В зависимости от вида главного движения, осуществляемого режущим инструментом в процессе выполнения операции, и конструкции этого инструмента различают три вида протягивания: осевое, осевое с выглаживанием и протягивание с принудительным вращением инструмента. Последнее обеспечивает более высокое качество обработки по сравнению с осевым протягиванием, особенно при обработке отверстий в пакетах из разнородных материалов.

Припуски под протягивание точных отверстий назначают таким образом, чтобы, во-первых, обеспечить минимальную длину протяжного инструмента, и, во-вторых, полностью и с некоторым запасом компенсировать погрешности, накопленные в процессе подготовки отверстий и выполнения технологических операций сборки элементов пакета с предварительно подготовленными отверстиями. Припуски устанавливают отдельно в каждом конкретном случае, исходя из особенностей технологического процесса сборки пакета и конструктивных особенностей входящих в него деталей и узлов. Припуск на обработку в смешанных пакетах, содержащих ВПКМ, составляет 0,3–0,5 мм [113].

Для обеспечения перемещения протяжки строго в осевом направлении (там, где не гарантируется перпендикулярность оси отверстия к опорной поверхности детали) применяются самоустанавливающиеся

после рис. 4.8 идет 4.10. Нужно перенумеровать!



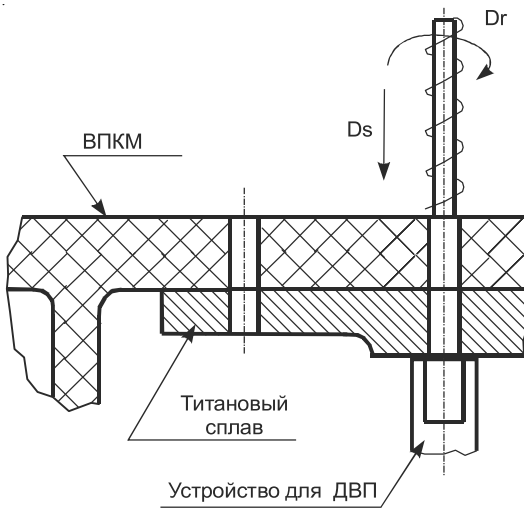



**Рис. 4.7.** Схема протягивания отверстий в пакете ВПКМ/титановый сплав [113]

упоры (рис. 4.7) или специальные упоры для мест с ограниченным подходом.

Режущее и деформирующее/выглаживающее протягивание проводится с применением смазочно-охлаждающей жидкости различного состава. В случае невозможности обильного полива в условиях агрегатной сборки эту жидкость наносят кистью на инструмент и поверхность отверстия. Протягивание отверстий в титановых сплавах допускается без применения СОТС.

### 4.2.5. Обработка высокоточных отверстий

При установке болт-заклепок и болтов с натягом возникает необходимость в изготовлении в однородных и смешанных пакетах отверстий 6–8 квалитетов точности. Одним из возможных способов изготовления высокоточных отверстий в смешанных пакетах является сверление с рассверливанием, зенкерованием и многократным развертыванием. Например, для изготовления отверстия в алюминиевом сплаве $d = 6H10$ мм необходимо выполнить следующие переходы [3]:

- сверление отверстия $d = 4{,}1$ мм (сверло);
- рассверливание отверстия до $d = 5{,}5$ мм (сверло);
- зенкерование отверстия $d = 5{,}7$ мм (зенкер);
- развертывание отверстия $d = 5{,}8$ мм (стандартная развертка);

- развертывание отверстия $d = 5{,}9$ мм (специальная развертка);
- снятие фаски 0,5х45° (зенковка);
- развертывание $d = 6$Н7мм (специальная развертка).

Высокая трудоемкость описанной технологи изготовления отверстий и высокие требования к квалификации исполнителей существенно повышают стоимость изготовления высокоточных отверстий. В этой связи более рациональным для изготовления высокоточных отверстий является использование процесса протягивания. Так, например, если развертыванием в металлах можно изготовить отверстия 7–9 квалитетов точности с шероховатостью поверхности Ra 0,8 мкм, то протягиванием можно уменьшить шероховатость поверхности до Ra0,4–Ra0,1 мкм. Однако из-за значительных осевых сил резания при протягивании, а также в силу сложной конструкции протяжек и, соответственно, технологии их изготовления, низкой стойкости при обработке ВПКМ протягивание отверстий в деталях из этих материалов применяется относительно редко. Кроме того, обработка протягиванием ВПКМ обеспечивает получение отверстий с точностью, как правило, не выше 9–10 квалитета.

Следует иметь в виду, если при обработке ВПКМ и применяется процесс протягивания, то при его практической реализации с помощью обычных протяжек на поверхности отверстия, как правило, образуются продольные риски. Чтобы избежать этого, необходимо применять протяжку с винтовыми режущими кромками и процесс протягивания осуществлять с вращением инструмента. При протягивании отверстия такой протяжкой и кинематикой резания имеет место пластическая деформация и, соответственно, упрочнение его стенок, что позволяет исключить дополнительное поверхностное упрочнение отверстий в тех случаях, когда это предусмотрено технологическим процессом их изготовления [3].

### 4.2.5. Упрочнение отверстий

Для повышения прочности и улучшения сопротивления различным видам нагрузок применяется операция упрочнения. Упрочнение может выполняться как для отверстий в металлах, так и в ВПКМ.

Упрочнение отверстий в металлах выполняют методами пластической деформации, реализуя дорнование или раскатывание отверстий [3, 17]. Деформированный поверхностный слой отверстия оказывает существенное влияние на показатели качества изделий

в целом: повышает жесткость соединения и ресурс работы изделия при повторно-статических и вибрационных нагрузках [17].

Упрочнение отверстий в ВПКМ выполняют нанесением дополнительных слоев композиционного материала в местах расположения отверстий с использованием специальных вкладышей. Тем не менее, несмотря на преимущества, подобное упрочнение имеет и недостатки, например, усложнение проведения ремонтных работ, а порой и их полную невозможность, в связи с чем подобные подходы не могут широко применяться, а их использование целесообразно лишь для чрезвычайно нагруженных участков [5].

Использование расширенных вкладышей или рукавов является экономически более выгодным решением, которое существенно не усложняет ремонта. Например, концентрацию напряжений на краях нагруженного отверстия в углепластике можно снизить посредством использования более жестких волокон на основе бора, или, напротив, локальным смягчением волокнами с низким модулем упругости на основе арамида. Включение этих волокон в состав слоистой структуры смешанного пакета позволяет увеличить скорость сверления (скорость резания и подачу). Другой метод смягчения заключается в объединении дополнительных листов углепластика с углом направленности волокон $\theta = 45^\circ$ или добавлением тонкого листа титана. Титановый сплав особенно эффективен при увеличении прочности на смятие. Все вкладыши дополнительно понижают напряжение смятия, увеличивая локальную толщину наружного слоя.

Более простой и менее дорогостоящий подход позволяет усилить отверстие при помощи внешнего удвоителя, изготовленного из ВПКМ или титанового сплава. Удвоитель должен быть соответственно скошен, чтобы минимизировать сдвиг фрагмента поверхности ВПКМ. Экспериментальными исследованиями установлено, что добавление дополнительного листа углепластика с углом $\theta = 45^\circ$ является наиболее эффективным и дешевым решением упрочнения пакета. Добавление пластин титанового сплава также является хорошим решением, но его использование сопряжено с дополнительными работами по подготовке отверстий и несколько большими затратами [5].

## Выводы

Технологический процесс сборки авиационных конструкций включает в себя большое количество разнородных операций. Значительную их долю составляют операции обработки отверстий. В зависимости от точности отверстия обработка может осуществляться в одну или несколько стадий.

Отверстия в однородных и смешанных пакетах 12–14 квалитета точности обрабатываются сверлением за один проход, а гнезда под головки крепежных элементов – зенкованием. Применение более производительных методов обработки давлением в сборочном производстве, как правило, невозможно.

Развертывание и протягивание обеспечивают лучшие показатели точности и производительности. При обработке однородных и смешанных пакетов, не содержащих слои ВПКМ, рекомендуется применять преимущественно протягивание. В то же время при обработке однородных или смешанных пакетов, содержащих ВПКМ, протягивание из-за больших сил резания не может эффективно применяться, а развертывание твердосплавными развертками обеспечивает наилучшее лучшее качество отверстий. Высокоточные отверстия в однородных и смешанных пакетах 6–9 квалитета точности обрабатываются за несколько стадий, включающих в себя сверление, зенкерование, развертывание или протягивание.

Превалирующим является обработка с использованием машин с механизированной подачей. При сборке ручное сверление, зенкерование и развертывание могут использоваться только в труднодоступных местах.

Для повышения прочности и улучшения сопротивления различным видам нагрузок выполняется упрочнение отверстий как в однородных, так и смешанных пакетах. Упрочнение выполняется при помощи наслоения дополнительных слоев ВПКМ в местах расположения отверстий с наложением специальных вкладышей, использованием расширенных вкладышей, рукавов и внешних удвоителей, изготовленных из ВПКМ или титанового сплава.

РАЗДЕЛ 5

# Особенности сверления отверстий в пакетах, содержащих ВПКМ

## 5.1. Механика стружкообразования

При сборке летательных аппаратов процесс формирования отверстий спиральными сверлами в сплошных смешанных пакетах ВПКМ/металл на сегодняшний день является одним из самых распространенных видов обработки. Механика процесса стружкообразования при сверлении ВПКМ, в том числе и спиральными сверлами, имея практически те же закономерности, что и при прямоугольном резании, описанном в разделе 3, все-таки существенно отличается от механики сверления металлов. В этом разделе рассмотрены современные представления об особенностях сверления ВПКМ, обусловленные кинематикой этого процесса и конструкцией инструмента.

Результаты исследований механики сверления спиральными сверлами смешанных пакетов ВПКМ/металл описаны в работах H. Hocheng [115], C. C. Tsao [54], J. P. Davim [32] and P. Reis [116], R. Piquet [64] et al. Основные отличительные особенности процессов сверления металлов и ВПКМ, сформулированные на основе этих работ, приведены в табл. 5.1.

При сборке летательных аппаратов процесс сверления ВПКМ обычно осуществляют перпендикулярно плоскости армирования. Поскольку на практике наиболее широко применяются разнонаправленные ВПКМ, то по мере перемещения сверла в движении подачи направление армирования вследствие многослойности ВПКМ изменяется, в результате чего при повороте режущей кромки сверла в главном движении резания направление волокон относительно режущей кромки тоже изменяется, что сопровождается изменением типа формируемой стружки.

**Таблица 5.1.** Принципиальные отличия процессов сверления металлов и ВПКМ

| Сверление металлов | Сверление ВПКМ |
|---|---|
| Вершина сверла проектируется так, чтобы обеспечить пластическое течение обрабатываемого материала за счет повышения температуры в зоне первичной деформации | Вершина сверла проектируется так, чтобы обеспечить образование как можно меньшего количества теплоты и создания наименьшей осевой силы |
| Преобладает суставчатая или сливная стружка | Преобладает элементная стружка |
| Наблюдается относительно малое трение ленточек по боковой поверхности отверстия | Наблюдается большое упругое восстановление обрабатываемого материала и вызванное этим значительное трение ленточек по боковой поверхности отверстия |

H. Hocheng and H. Y. Puw [115] обнаружили, что стружка, образованная при сверлении ВПКМ, может быть различной также и в зависимости от материала матрицы. Например, при сверлении термопластика, армированного углеволокном, они получили сливную стружку, а при сверлении в тех же условиях реактопластика, также армированного углеволокном, – мелкую пылеобразную стружку.

Особенностью сверления отверстий в смешанных пакетах ВПКМ/металл является наличие в одном процессе противоречивых условий обеспечения оптимального процесса резания различных материалов.

Практика показала, что из широко применяемых в авиационной промышленности композиций ВПКМ/металл с точки зрения обеспечения процесса механической обработки резанием, в т.ч. сверлением, наиболее сложной комбинацией является ВПКМ/Ti:

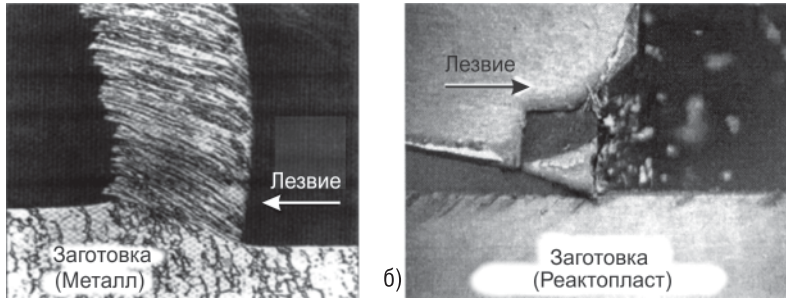



**Рис. 5.1.** Сравнение стружки при резании металлов (а) и ВПКМ (б)[117]

для обеспечения требуемой стойкости режущего инструмента и качества поверхности при сверлении слоя ВПКМ необходимы высокая скорость резания и малая подача, а для титанового сплава, наоборот, низкая скорость резания и большая подача [117]. Даже при сверлении пакетов ВПКМ/Al, несмотря на хорошую обрабатываемость алюминиевых сплавов по аналогии со сверлением пакета ВПКМ/Ti для обеспечения надежного стружкодробления (рис. 5.1) и эффективного удаления стружки также необходимо изменять режимы резания в процессе перемещения сверла в разных слоях этого пакета [36].

Помимо плохого дробления и затрудненного удаления стружки при сверлении смешанных пакетов наблюдается также и нежелательное воздействие металлической стружки на стенки той части отверстия, которая формируется в слое из ВПКМ, вызывающее его термическую деструкцию и механические повреждения [27, 36].

## 5.2. Осевая сила и крутящий момент

Осевая сила и крутящий момент, возникающие в процессе сверления ВПКМ сверлами различных конструкций, из-за их определяющего влияния на качество формируемых отверстий (точность размера, точность формы и взаимного расположения, физико-химико-механическое состояние обработанной поверхности и т.п.) изучались многими исследователями весьма подробно [28, 71, 118 и др.]. С точки зрения изменения осевой проекции силы резания (осевой силы) процесс сверления отверстия в сплошном материале может быть разделен на пять этапов (рис. 5.2а): врезание поперечной режущей кромки (участок AB), врезание главных режущих кромок (участок BC), основное сверление (участок CD), начало выхода сверла (выход перемычки – участок DE) и выход главных режущих кромок (участок EF).

Осевая сила начала выхода сверла может быть точно определена из эксперимента в момент D – момент, когда поперечная режущая кромка сверла (перемычка) достигает положения нижнего слоя заготовки. Дальнейшее уменьшение осевой силы связано с выходом вершины сверла из контакта с заготовкой. Следует отметить, что если нижний слой заготовки состоит из ВКПМ, то на выходе может происходить его расслоение.

Точно определить осевую силу на входе поперечной режущей кромки в слой из ВПКМ (участок AB) достаточно сложно, поскольку, во-первых, осевая сила не начинает увеличиваться точно в момент

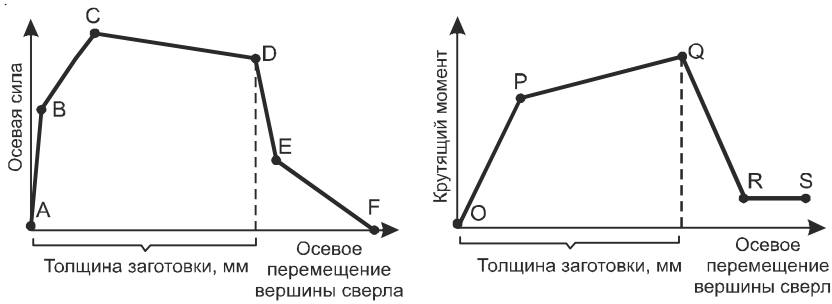



**Рис. 5.2.** Принципиальная схема изменения осевой силы (а) и крутящего момента (б) при сверлении ВПКМ спиральными сверлами [58]

касания поперечной режущей кромки сверла верхнего слоя заготовки (точка A) из-за упругой деформации обрабатываемого материала и, во-вторых, неизвестно, какое расстояние (как правило, достаточно малое) должно пройти сверло, чтобы поперечная режущая кромка полностью вступила в контакт с верхним слоем заготовки (точка B). Эта неоднозначность часто приводит к определенным трудностями при анализе процесса расслаивания обрабатываемого материала из ВПКМ при врезании поперечной режущей кромки (см. раздел 2).

Крутящий момент по мере перемещения сверла в обрабатываемом материале также изменятся (рис. 5.2б). Поскольку крутящий момент при врезании поперечной режущей кромки пренебрежимо мал, он, начиная с момента их врезания в верхний слой заготовки, постепенно возрастает за счет увеличения длин главных режущих кромок, участвующих в резании (участок OP). После входа вершины сверла в полный контакт с заготовкой крутящий момент за счет увеличения активной длины ленточек и упругого восстановления поверхности вновь образованного отверстия (участок PQ) продолжает возрастать, но с меньшей скоростью, чем на участке OP. Начиная с выхода поперечной режущей кромки из контакта с заготовкой (точка Q) по мере уменьшения длин главных режущих кромок, участвующих в резании, крутящий момент уменьшается (участок QR), но не до нуля (точка R) из-за наличия контакта между ленточками сверла и внутренней поверхностью формируемого отверстия (участок RS).

Часто при сверлении с помощью ручных машин используются комбинированные инструменты типа «сверло/развертка» (см. раздел 6, рис. 6.23е), которые позволяют, во-первых, повысить точность

формируемого отверстия и, во-вторых, совместить операции предварительной (черновой) и чистовой (окончательной) обработки отверстия, а следовательно, сократить (и часто существенно) время его изготовления. При формировании отверстия с помощью такого инструмента по аналогии со сверлением обычным спиральным сверлом, можно выделить несколько этапов. Следует обратить внимание на то обстоятельство, что условия нагружения (силы и крутящий момент) сверл, в т.ч. и таких, как «сверло/развертка», в значительной степени определяются соотношением толщины заготовки (глубины сверления) и осевых размеров инструмента: вершины сверла, его калибрующего участка, режущей и калибрующей частей развертки. В качестве примера рассмотрим случай, когда толщина заготовки меньше длины режущей части «сверла/развертки» (рис. 5.3, табл. 5.2) [32, 107, 118, 119].

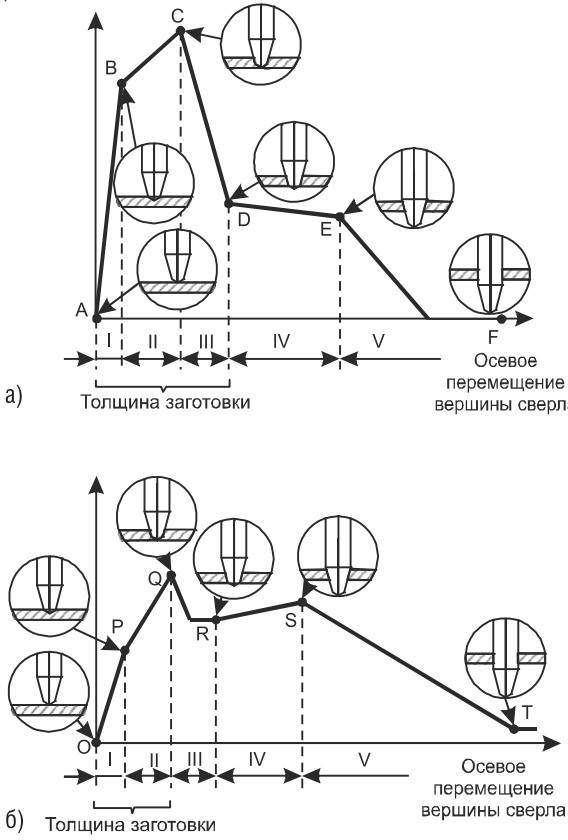



**Рис. 5.3.** Принципиальная схема изменения осевой силы (а) и крутящего момента (б) при сверлении ВПКМ комбинированным инструментом «сверло/развертка» [119]

**Таблица 5.2.** Характеристика этапов сверления отверстия комбинированным инструментом «сверло/развертка» в ВПКМ [32]

| Этап сверления | | | Осевая сила | Крутящий момент |
|---|---|---|---|---|
| I | Вдавливание | Поперечная режущая кромка сверла (перемычка) вступает в начальный контакт и вдавливается в заготовку | Резко возрастает из-за вдавливающего действия поперечной режущей кромки (участок AB) | Постепенно возрастает с увеличением трения между поперечной режущей кромкой и заготовкой, но из-за малого диаметра поверхности контакта (участок OP) |
| II | Вдавливание и сверление | Начинается удаление материала главными режущими кромками при их вхождении в заготовку | Возрастает по мере вхождения главных режущих кромок в заготовку (участок BC) | Возрастает пропорционально длине режущих кромок (участок PQ) |
| III | Сверление | Выход из заготовки перемычки при достижении вершины сверла ее нижней поверхности | Резко уменьшается, когда поперечная режущая кромка выходит из заготовки (участок CD) | Уменьшается из-за выхода перемычки и уменьшения рабочих (режущих) участков главных режущих кромок (участок QR) |
| IV | Сверление и развертывание | Вхождение в заготовку режущей части развертки и постепенный выход из нее вершины сверла | Наблюдается некоторое уменьшение в связи с преобладающим влиянием уменьшения рабочих участков главных режущих кромок при выходе вершины над увеличением длины рабочего участка режущей части развертки (участок DE) | Незначительно возрастает из-за увеличения радиуса контакта нижних режущих кромок (участок RS) |
| V | Развертывание | Главные режущие кромки сверла выходят из заготовки | Уменьшается в связи с уменьшением активной длины режущих кромок развертки при ее выходе из заготовки (участок EF) | Уменьшается из-за уменьшения активной длины режущих кромок развертки (участок ST) |

Как экспериментально установили L.M. Durao [12], J.P. Davim [32] и другие влияние режима резания на осевую силу и крутящий момент подчиняется общей тенденции для ВПКМ (раздел 3). Скорость резания имеет наименьшее влияние (рис. 5.4а), причем существует скорость резания, при которой осевая сила минимальна. Подача, наоборот, оказывает на осевую силу наибольшее влияние (рис. 5.4б).

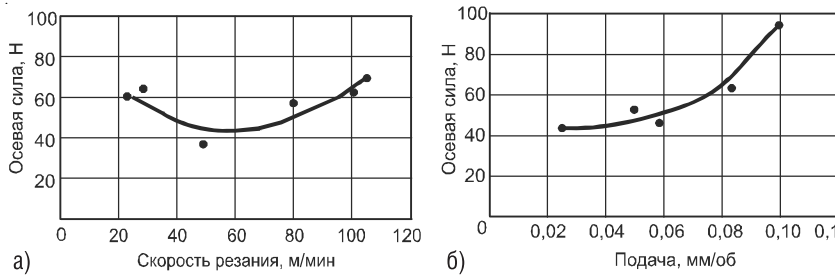



**Рис. 5.4.** Влияние скорости резания (а) и подачи (б) на осевую силу при сверлении углепластика [12]

Уменьшение подачи вызывает уменьшение силы вдавливания, которое возникает в несрезанных слоях материала. Однако, как доказано экспериментально [12, 57, 115], использование подач меньше 0,015–0,02 мм/об приводит к избыточному выделению тепла и нагреву обрабатываемого материала.

В цикле сверления смешанных пакетов совмещаются циклы сверления отдельных слоев, включая описанные ранее особенности входа и выхода инструмента. Типичные диаграммы изменения осевой силы и крутящего момента, построенные на основе исследований авторов по сверлению пакетов углепластик/Ti, представлены на рис. 5.5. Аналогичные диаграммы были получены другими исследователя для пакетов углепластик/Al [36] и Gr-Bi/Ti [72].

В общем случае процесс сверления смешанного пакета может быть разделен на семь отдельных этапов, границы между которым тем расплывчатее, чем меньше угол при вершине сверла. Этап I определяет период, когда поперечная кромка сверла только входит в слой ВПКМ. На этапе II режущие кромки начинают резание слоя ВПКМ, а на этапе III в работе по резанию ВПКМ участвуют все участки главных режущих кромок. Осевая сила сохраняется неизменной вплоть до касания поперечной режущей кромки к слою металла. Крутящий момент несколько возрастает из-за увеличения трения между ленточками и обработанной поверхностью отверстия. На этапе IV начинают контактировать с металлическим слоем сначала поперечная режущая кромка, а затем и главные режущие кромки сверла. Как только в металлический слой входит вся вершина сверла, осевая сила увеличивается до максимальной величины. На этапе V поперечная кромка сверла вы-

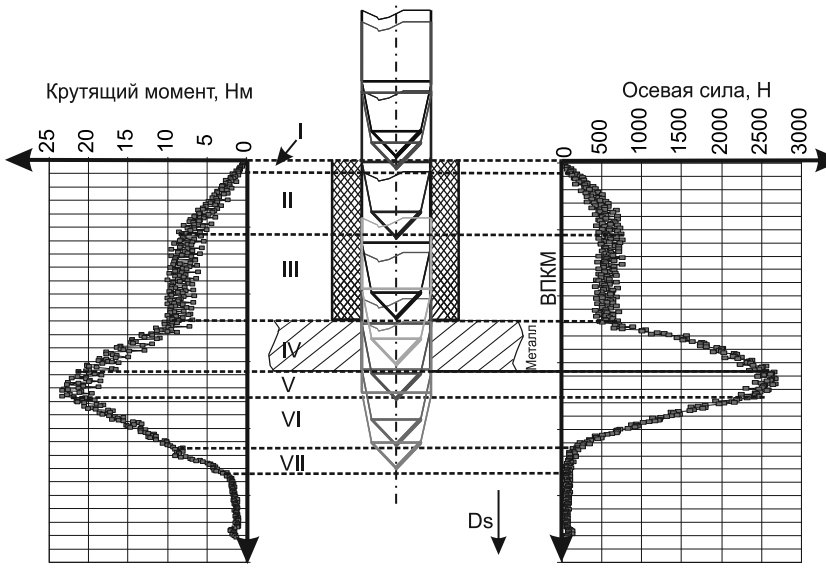



**Рис. 5.5.** Типичные диаграммы изменения осевой силы и крутящего момента при сверлении смешанного пакета ВПКМ/металл

ходит из металлического слоя. Максимальный вращающий момент в металлическом слое наблюдается непосредственно от начала этапа V на всем его протяжении в зависимости от толщины металлического слоя и осевого размера вершины сверла.

В течение этапа VI режущие кромки сверла постепенно выходят из металлического слоя, вследствие чего уменьшаются как осевая сила, так и крутящий момент. Осевая сила и крутящий момент уменьшаются до полного выхода вершина сверла из металлического слоя, но, как и в случае сверления одиночных листов ВПКМ, не до нуля. Дополнительная величина осевой силы и крутящего момента создаются вследствие наличия заусенцев, металлической стружки, заполняющей стружечные канавки сверла [120], а также за счет трения ленточек о боковую поверхность сформированного отверстия, причем в большей степени в слое ВПКМ. В течение этапа VII происходит удаление остатков стружки, деформация заусенца, уменьшение трения, что в конечном счете приводит к дальнейшему уменьшению осевой силы и крутящего момента.

Осевая сила и крутящий момент максимальны при прохождении сверла через металлический слой. Величины осевой силы и крутящего момента при сверлении металлического слоя, как правило, в несколько раз больше, чем при сверлении слоя ВПКМ. Так в опытах R. Zitoune [36] и др. по сверлению смешанного пакета углепластик/Al с подачей 0,05–0,15 мм/об осевая сила в алюминиевом слое превышала осевую силу в слое углепластика в 2–3 раза, причем тем больше, чем большими являются подача и диаметр сверла. Это связано с увеличением площади сечения среза и длины поперечной режущей кромки.

## 5.3. Тепловые процессы

В отличие от других процессов резания при сверлении стружка отводится по стружечным канавкам сверла, в результате чего более длительное время контактирует с режущим инструментом. Ранее отмечалось, что до 90% теплоты, выделившейся при резании, может оставаться в стружке (см. п. 3.1.4). Это в сочетании с низкой удельной теплопроводностью ВПКМ при сверлении этих материалов приводит к дополнительному нагреванию сверл. В результате при сверлении ВПКМ около 50% теплоты поступает в инструмент, а остальное почти в равных долях распределяется между заготовкой и стружкой. При сверлении металлов 75% и более теплоты удаляется со стружкой, 18% поглощается инструментом и только 7% обрабатываемой заготовкой [12, 32]. По данным K. Weinert [121], Chen Wen-Chou [46], температура на поверхности контакта инструмента с заготовкой может превысить пороговый уровень 300 °С, который вызывает понижение граничного сопротивления срезу матрицы и в конечном счете влечет выгорание матрицы и ускорение расслаивания волокон. Например, локальная температура в установившемся режиме сверления углепластика твердосплавным сверлом диаметром 5 мм составляет немногим более 500 °С при частоте вращения сверла 15 000 об/мин и подаче 0,2 мм/об [104].

Сверление смешанных пакетов сопряжено с дополнительным повышением температуры по нескольким причинам. Во-первых, при сверлении металлов, например, титана и его сплавов, выделяется больше теплоты, что способствует повышению температуры. Во-вторых, плохой отвод тепла, вызванный низкой удельной теплопроводностью титановых сплавов, также приводит к дополнительному повышению температуры на поверхности отверстия и температуры инструмента. Высокая температура стружки, которая возникает при резании тита-

новых сплавов, увеличивает глубину повреждений поверхности отверстия в слое ВПКМ и износ инструмента, что, в свою очередь, приводит к увеличенным силам резания, увеличению заусенца, расслаиванию, термической деструкции обработанной поверхности и увеличению ее шероховатости. Температура резания тем больше, чем больше скорость резания и меньше подача [72].

При обработке отверстий в ВПКМ предпочтительно сверление без применения СОЖ, так как СОЖ снижает прочность деталей из ВПКМ и загрязняет рабочее место [68]. Часто применение СОЖ на сборочных операциях запрещено нормативной документацией. Более того, некоторые исследования показали, что применение СОЖ при сверлении ВПКМ не дает заметного улучшения по сравнению с резанием без применения СОЖ [122].

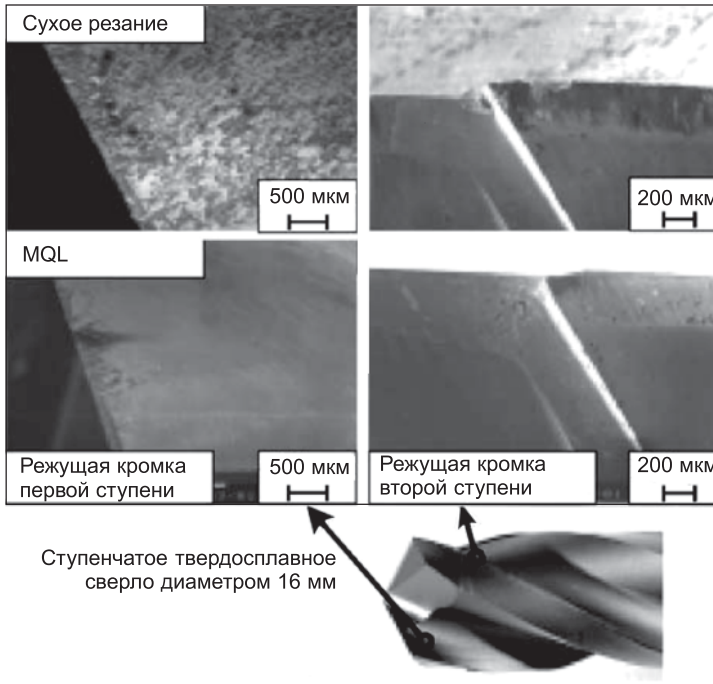



**Рис. 5.6.** Сравнение износа ступенчатого твердосплавного инструмента при сверлении пакета углепластик/алюминий в условиях резания без применения СОЖ и с применением MQL [27]

Для снижения температуры резания при сверлении ВПКМ и смешанных пакетов, могут применяться техника минимальной смазки (MQL), охлаждение жидким азотом, новые инструментальные материалы и пониженные режимы резания.

Применение СОЖ на основе спирта с ее минимальной подачей через внутренние каналы сверл является наиболее приемлемым вариантом в сборочном производстве. Этот метод охлаждения обеспечивает улучшенные условия трения на контактных поверхностях инструмента, снижает налипание металлической стружки (особенно алюминиевой) на сверлах, обеспечивает повышенную точность сверления. Например, при сверлении отверстий диаметром 16 мм с применением технологии MQL можно обеспечить отклонение диаметра менее 17 мкм по всей длине отверстия за счет снижения интенсивности изнашивания (рис. 5.6). Этот эффект наблюдается как при сверлении единичных листов ВПКМ, так и смешанных пакетов ВПКМ/алюминиевый сплав [27] и ВПКМ/титановый сплав [67].

## 5.4. Износ и стойкость сверл

Независимо от применяемого инструментального материала абразивное изнашивание является превалирующим механизмом изнашивания сверл при обработке ВПКМ (рис. 5.7д, е, ж). Однако в отличие от прямоугольного резания для сверления ВПКМ характерны повышенные температуры и стружкообразование путем хрупкого разрушения твердых волокон, закрепленных в мягкой матрице как под действием режущих лезвий, так и за счет вдавливания поперечной режущей кромки [104]. Эти особенности приводят к тому, что в некоторых случаях наблюдается выкрашивание режущих кромок (рис. 5.7а, б, в, г) и даже адгезионно-усталостное изнашивание (рис. 5.7з) твердосплавных инструментов [26, 104].

По данным S. K. Malhotra [123], S. Rawat et al. [104], при сверлении углепластиков сверлами из быстрорежущей стали и твердых сплавов износу подвергается поперечная режущая кромка, задняя поверхность главных режущих кромок, вершина и вспомогательные режущие кромки сверла (рис. 5.7).

Из-за превалирующего абразивного изнашивания при сверлении углепластика износ инструмента практически не зависит от скорости резания, но существенно зависит от суммарной длины срезанных волокон [124]. В случаях, когда активизируются другие возможные

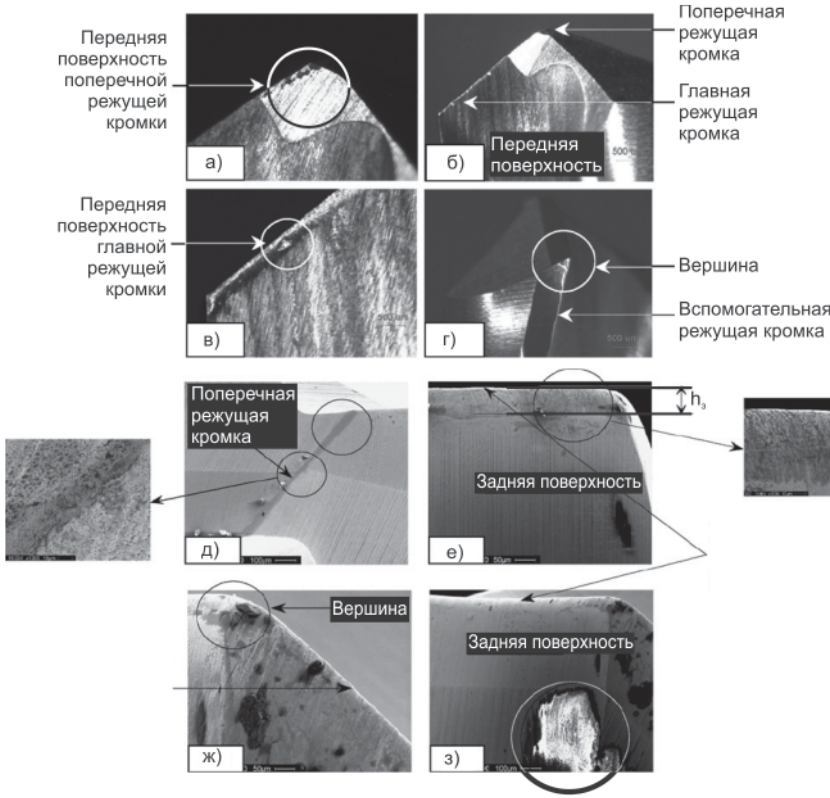



**Рис. 5.7.** Места выкрашивания твердосплавных сверл диаметром 5 мм после сверления углепластика ($n$ = 15 000 об/мин, $s$ = 0,1 мм/об) [104]:
а – на передней поверхности вдоль поперечной режущей кромки после сверления 10 отверстий;
б – на передней поверхности после сверления 100 отверстий;
в – на передней поверхности (увеличенное изображение (б));
г – в вершине и на вспомогательной режущей кромке после сверления 50 отверстий;
д – износ поперечной режущей кромки в результате абразивного изнашивания;
е – износ по задней поверхности главной режущей кромки в результате абразивного изнашивания;
ж – округление вершины сверла;
з – адгезия углерода на задней поверхности и в вершине сверла, которая проявлена химическим методом

механизмы изнашивания, например, диффузионное, химическое, как показано в работах H. Inoue et al. [125], D. Kim и M. Ramulu [43], S. C. Lin and I. K. Chen [126], интенсивность изнашивания по задней поверхности возрастает с увеличением скорости резания из-за повышения температуры резания.

Своеобразное влияние на процесс изнашивания оказывает подача. При очень малых подачах весьма длительный контакт инструмента с заготовкой способствует накоплению теплоты и повышению температуры, а следовательно, и ускоряет изнашивание. При больших подачах чрезмерно большие нагрузки на инструмент приводят к интенсификации абразивного изнашивания, разрушению и выкрашиванию режущих кромок [104].

Повышение температуры является основной проблемой при сверлении смешанных пакетов, поскольку высокая температура в зоне резания, помимо прочего, существенно снижает стойкость инструмента. При сверлении с помощью одного и того же инструмента лезвие может последовательно подвергаться нескольким механизмам изнашивания в зависимости от состава пакета и расположения слоев (табл. 5.3).

Так, например, при сверлении слоя ВПКМ может превалировать абразивное изнашивание, при сверлении алюминиевого слоя – адгезионно-усталостное изнашивание, при сверлении слоя титанового сплава – химическое изнашивание.

Такое сочетание механизмов изнашивания инструмента при его перемещении в разных слоях наиболее опасно для лезвия, поскольку оно не успевает приспособиться под сложившиеся условия.

Принятые критерии износа и их величины являются важными параметрами процесса сверления ВПКМ. Например, по данным F. Klocke and C. Wurtz [127], традиционный для сверления металлов критерий износа, определяемый по величине фаски износа на задней поверхности $h_з = 0{,}3$ мм, не может быть использован при сверлении ВПКМ из-за ухудшения качества поверхности уже при $h_з = 0{,}2$ мм. По мнению [47], основным критерием износа сверл при обработке смешанных пакетов может быть принята острота режущих кромок, т.е. величина радиуса их округления ρ, ограничиваемая требованиями к качеству обработанной поверхности.

Износ сверл – это и основной фактор, изменяющий качество отверстия в процессе обработки (см. раздел 2). Такие факторы, как время сверления, скорость резания и подача, также могут влиять на качество отверстия, но в меньшей степени, чем износ инструмента. По-

**Таблица 5.3.** Возможные механизмы изнашивания при сверлении смешанных пакетов [117]

| Изнашивание | |
|---|---|
| механическое | термохимическое |
| *Абразивное*: скольжение твердой фазы по поверхности контакта инструмента со стружкой и заготовкой | *Изнашивание растворением*: термически активируемые механизмы – перенос атомов через поверхность раздела сред |
| *Изнашивание расслаиванием*: последовательная нагрузка приводит к распространению трещин и отслоению алмазного покрытия | *Диффузионное изнашивание*: составляющие инструментальных материалов могут диффундировать в стружку |
| *Адгезионно-усталостное* (характерно для алюминия): вырывание частиц инструментального материала с поверхности инструмента под действием адгезионных связей | *Химическое изнашивание* (характерно для титановых сплавов): химическая реакция между материалом инструмента и заготовкой |
| Термомеханическая усталость | |

этому для сохранения приемлемого качества отверстий в процессе обработке необходимо уменьшение интенсивности изнашивания сверл, что может быть достигнуто за счет выбора таких рациональных инструментальных материалов, геометрии инструмента и режимов сверления, которые бы способствовали уменьшению времени контакта сверла с заготовкой, а следовательно, и температуры резания. Вместе с тем сложное, а в некоторых случаях и противоречивое влияние этих факторов на показатели процесса сверления не всегда позволяет добиться желаемого результата. При прочих равных условиях:

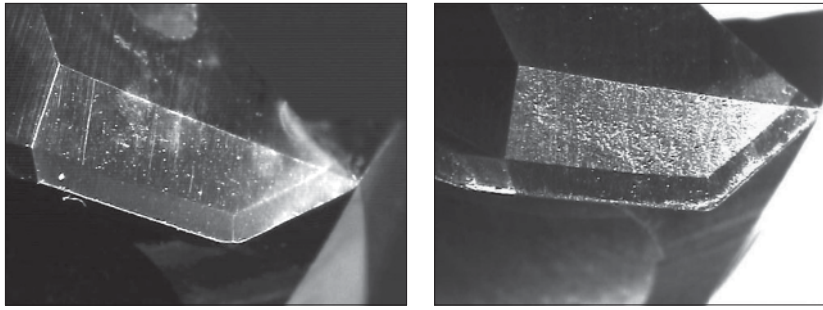
- увеличение подачи уменьшает время контакта инструмента с заготовкой, но и увеличивает осевую силу. Следовательно, увеличивается вероятность расслаивания и повышается интенсивность изнашивания инструмента;
- уменьшение подачи уменьшает осевую силу, но увеличивает время контакта инструмента с заготовкой и, следовательно, температуру резания и интенсивность изнашивания;
- увеличение скорости резания уменьшает осевую силу, а, следовательно, и вероятность расслаивания, но увеличивает температуру резания и вибрации, что сопровождается повышением интенсивности изнашивания инструмента;
- уменьшение скорости резания увеличивает осевую силу, что, как правило, сопровождается возрастанием вероятности расслаивания.

При сверлении углепластиков износ сверл в значительно большей степени зависит от скорости резания, чем при сверлении сталей и чугунов. На это указывает величина модуля показателя степени в формуле допускаемой скорости резания: для сталей и чугунов она находится в пределах 0,13–0,4, в то время как при сверлении углепластиков его величина приближается к значению 0,6. Например, для твердосплавных сверл диаметром 5 мм при сверлении углепластика скорость резания $V$ (м/мин), допускаемая стойкостью инструмента $T$ (мин), может быть расчитана по формуле [104]:

$$V = 3{,}08 \cdot T^{-0{,}56}.$$

Осевая сила и крутящий момент являются функциями подачи, геометрии сверла, толщины обрабатываемой заготовки и величины износа инструмента, выраженного, например, количеством обработанных отверстий [44, 47, 104, 107, 119]. Осевая сила увеличивается с развитием износа. Влияние износа на крутящий момент менее заметно. Ранее было показано, что влияние износа инструмента на осевую силу изменяется на различных этапах сверления. Интересно, что чем тоньше обрабатываемая заготовка, тем больше увеличивается осевая сила, возникающая из-за износа сверла. Чем больше подача, тем существеннее влияние износа инструмента на осевую силу.

Чувствительность к износу и возможность контроля без остановки процесса сверления делает описанные силовые характеристики процесса сверления удобными для практического определения величины износа сверл. Это особенно важно при большой толщине обра-



а) б)

**Рис. 5.8.** Режущая кромка сверла Sandvik Coromant PT 86 нового (а) и изношенного после сверления 100 отверстий в смешанном пакете ВПКМ/Ti (б) [67]: $n$ = 550 об/мин, $S$ = 0,055 мм/об; $d$ = 6,35 мм

батываемой заготовки [58]. Например, в работе [67] при сверлении смешанного пакета ВПКМ/Ti сверлом Sandvik Coromant PT 86 ∅6,35 мм с использованием машины Quackenbush 15QDA критический износ оценивался величиной осевой силы, которая составила 335 Н, что соответствовало ресурсу сверла в 100 отверстий. Износ сверла для рассмотренного примера показан на рис. 5.8.

## 5.5. Влияние различных факторов на расслаивание обрабатываемого материала

Степень влияния различных факторов на расслаивание обрабатываемого материала при сверлении отверстий в заготовках из ВПКМ может быть представлена в порядке убывания степени воздействия в следующем порядке (рис. 5.9) [45]: подача, износ инструмента, геометрия и конструкция инструмента, материал матрицы и схема армирования ВПКМ, скорость резания. Уменьшение вероятности расслаивания может быть достигнуто путем применения некоторых технологических приемов, например, таких, как установка опорной пластины, предварительное выполнение направляющего отверстия, адаптивное управление подачей, предварительный подогрев сверла и др. Пожалуй, наиболее эффективным способом является установка опорной пластины, хотя он и не всегда практически осуществим (см. раздел 7).

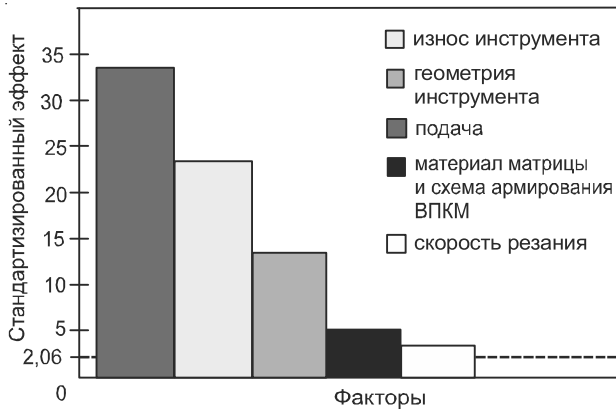



**Рис. 5.9.** Степень влияния различных факторов на величину расслаивания при сверлении углепластиков [45]: уровень значимости $\alpha = 0{,}05$

### 5.5.1. Влияние режима резания

В экспериментальных работах W. Chen [46], C. C. Tsao and H. Hocheng [57, 70, 128], G. Caprino and V. Tagliaferi [33] и других [12, 28, 32, 45] было установлено, что подача при прочих равных условиях является элементом режима резания, который при сверлении наиболее существенно влияет на расслаивание ВПКМ (рис. 5.10).

При малой подаче внутренняя поверхность отверстия гладкая и обычно имеет малое расслаивание. Если подача достаточно мала, то расслаивание может возникнуть только на выходе сверла, когда поперечная режущая кромка и большая часть главных режущих кромок уже практически вышли из отверстия.

Это явление возникает из-за сил, действующих в на уголках сопряженных лезвий, где имеет место наибольшая величина износа сверла [175]. При большой подаче отверстие, как правило, значительно повреждается, т.е. расслаивание в этом случае распространяется на большее количество слоев, что сопровождается возникновением межслоевых трещин и вследствие этого интенсивным разделением слоев [33, 129].

Увеличение скорости резания при прочих равных условиях хотя и приводит к снижению осевой силы и крутящего момента, в т.ч. и из-за увеличения температуры резания и изменения механических свойств ВПКМ, все-таки сопровождается увеличением степени повреждения отверстия от высоких температур. При высокой скорости резания волокна не срезаются чисто из-за возрастания под действием

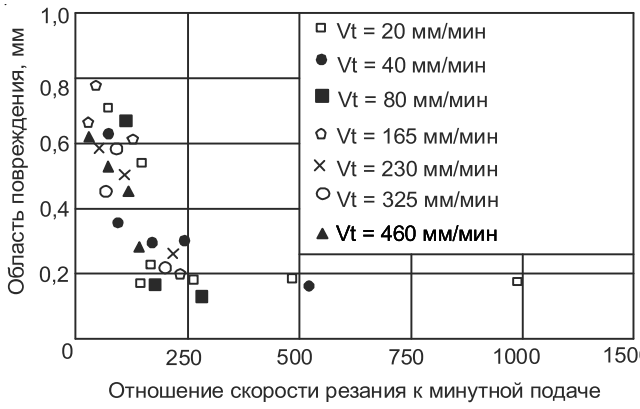



**Рис. 5.10.** Влияние отношения скорости резания (при $V$ = const) к минутной подаче $V_t$ на ширину области повреждения, $\Delta D = D_{max} - D$ [33]

высоких температур их пластичности и степени «размазывания». При высоких скоростях резания наблюдаются также и неполное срезание волокнистого наполнителя, в результате чего увеличивается эллипсность отверстий [69].

При сверлении углепластиков быстрорежущими и твердосплавными сверлами обычно применяются скорости резания от 20 до 150 м/мин, тогда как величины подачи обычно меньше, чем 0,3 мм/об [53, 130]. На практике скорость резания ограничивается двумя факторами – максимально возможной частотой вращения сверла и температурой резания, определяющей термическую деструкцию. Поскольку при сборке летательных аппаратов редко используются сверла диаметром больше 10 мм, то и скорость резания на практике, как правило, не превышает 150 м/мин. Использование подач более 0,3 мм/об, как правило, сопровождается расслаиванием ВПКМ. Меньшая подача, с одной стороны, улучшает качество отверстий, но с другой – снижает ресурс инструмента и производительность обработки.

### 5.5.2. Влияние износа сверла

Как уже было показано, износ сверл приводит к расслаиванию ВПКМ, и в первую очередь слоев пакета на выходе инструмента из заготовки. Коэффициент расслаивания увеличивается с увеличением износа по задним поверхностям сверла и уголкам сопряженных лезвий в результате увеличения осевой силы [32]. Для спиральных сверл при обработке ВПКМ характерным является также и большая, чем при обработке сталей, величина износа поперечной режущей кромки (рис. 5.11). Такое изменение геометрии сверла, связанное с его износом, приводит к некоторому увеличению критической осевой силы $P_x$, а следовательно, и к увеличению степени расслаивания [131].

Влияние износа сверла на коэффициент расслаивания становится существенным и при высоких скоростях резания. Повреждение поверхности при больших скоростях резания непосредственно связано с износом сверла. Новые сверла формируют блестящие чистые поверхности, в то время как изношенные сверла поверхность оплавляют, что сопровождается увеличением коэффициента расслаивания. Эта проблема может быть частично решена путем уменьшения по мере износа сверла частоты вращения шпинделя, а, следовательно, и скорости резания. Однако понижения частоты вращения шпинделя обычно избегают, поскольку это увеличивает осевую силу и потенциально

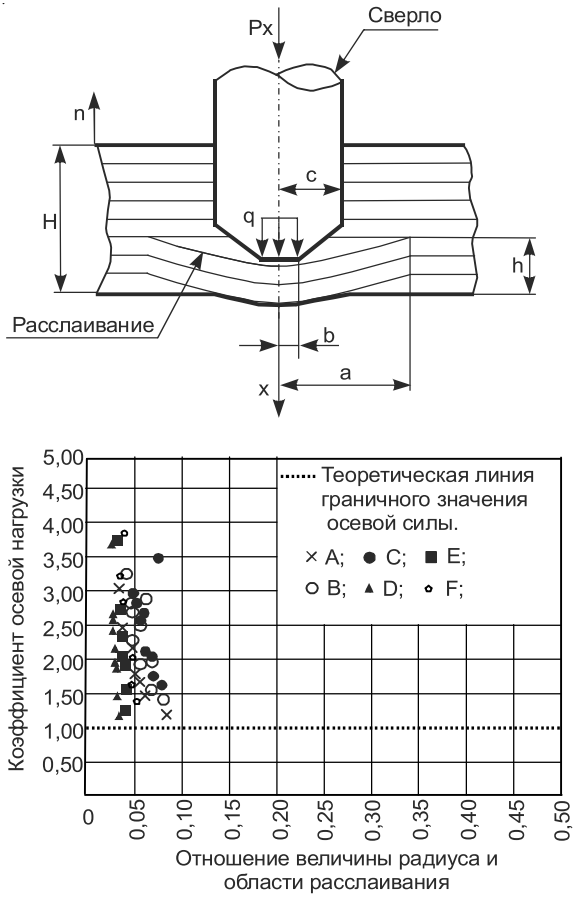



**Рис. 5.11.** Влияние фаски износа поперечной режущей кромки на величину расслаивания при сверлении углепластика в различных условиях [131]

увеличивает возможность расслаивания. Однако если частоту вращения шпинделя уменьшать после «прорыва» нижнего слоя, когда осевая сила уже намного ниже из-за выхода перемычки из контакта с заготовкой, то расслаивания можно избежать. Расслаивание можно избежать и при использовании комбинированного инструмента, например, сверла-развертки, что позволяет обеспечить развертывание при значительно меньшей скорости резания, чем сверление, без явных следов расслаивания [107].

### 5.5.3. Влияние геометрических параметров и конструкции инструмента

Геометрические параметры и конструкция инструмента влияет при сверлении ВПКМ на все виды повреждений.

Для любой конструкции инструмента расслаивание наружных волокон у поверхности врезания (входа) увеличивается с увеличением переднего угла $\gamma$ [32]. Для снижения или устранения расслаивания наружных волокон у поверхности врезания необходим малый передний угол, который препятствует поднятию и отрыву первого слоя. Рекомендуемая величина переднего угла меньше 6°.

Расслаивание наружных волокон у поверхности выхода режущего инструмента может быть уменьшено путем смещения точки приложения осевой силы от центра к периферии отверстия, что позволяет увеличить критическую осевую силу. Этому способствует уменьшение длины контакта нижнего слоя с главными режущими кромками и изгибающих напряжений в нем. Задачу уменьшения величины расслаивания при сверлении спиральными сверлами решают путем уменьшения угла при вершине, применения специальных форм заточки вершины спиральных сверл (например, с острием, многоплоскостная заточка и т.п. (рис. 5.12 и 5.13)), специальных конструкций сверл (например, трубчатых (см. раздел 6)). Установлено, что чем больше угол при вершине, тем больше вероятность возникновения расслаивания. Углы при вершине при сверлении спиральными сверлами ВПКМ принимают 90°, 125–130°; при сверлении титанового сплава – 140°, при сверлении алюминиевого сплава 90–118° [12, 69, 132, 133].

Влияние подачи на осевую силу для различных сверл показано на рис. 5.14. Наибольшая осевая сила имеет место при сверлении спиральным сверлом с нормальной заточкой, а наименьшая –

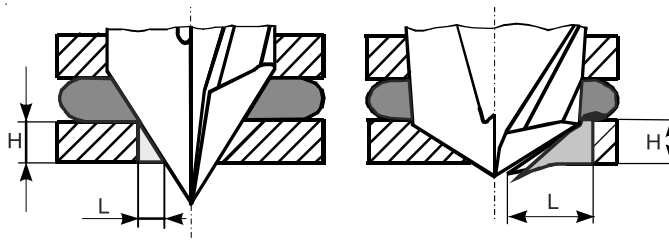



**Рис. 5.12**. Специальные формы заточки вершины спиральных сверл, уменьшающие расслаивание [134]

а) б) в)

**Рис. 5.13.** Изображения, полученные методом ультразвуковой дефектоскопии, показывающие распространение расслаивания, вызванного сверлением с помощью спиральных сверл ($s$ = 0,01 мм/об, $n$ = 1000 об/мин, $d$ = 8 мм) с нормальной заточкой (а), с острием (б), с пилообразной вершиной (в) [57]

при сверлении ступенчатым сверлом и спиральным сверлом с острием. Вместе с тем критическая величина осевой силы для каждой конструкции сверла различна, что в совокупности обеспечивает преимущество ступенчатого сверла (табл. 5.4).

Инструментальный материал влияет на расслаивание через интенсивность изнашивания, коэффициент трения и радиус округления режущей кромки.

Применение специальных форм заточки спиральных сверл из быстрорежущей стали не позволяет получить ощутимого эффекта при

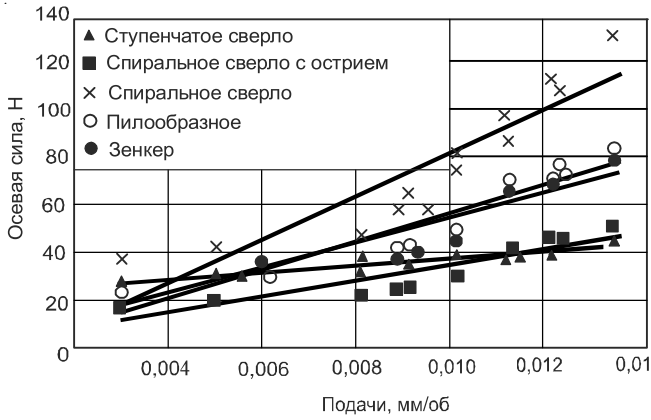



**Рис. 5.14.** Влияние подачи на осевую силу для некоторых специальных сверл [132]

**Таблица 5.4.** Критическая осевая сила и подача, обеспечивающие сверление без расслаивания [71]

| Сверло | Расчетная критическая осевая сила, Н | Экспериментальная критическая осевая сила, Н | Критическая подача, мм/об |
|---|---|---|---|
| Спиральное сверло | 34,1 | 31,8 | 0,0047 |
| Пилообразное сверло | 38,8 | 30,5 | 0,0051 |
| Спиральное сверло с острием | 36,2 | 26,4 | 0,0069 |
| Зенкер | 48,4 | 42,7 | 0,0075 |
| Ступенчатое сверло | 31,4 | 29,1 | 0,0049 |

обеспечении требуемого качества обработанной поверхности [53]. В то же время сверла с короткой перемычкой и острой режущей кромкой из твердого сплава или поликристаллического алмаза обеспечивают наименьшее расслаивание [45]. Поэтому для обработки ВПКМ предпочтительными являются твердосплавные инструменты или инструменты с применением поликристаллического алмаза.

Экспериментально установлено, что на расслаивание отверстия может существенно влиять биение сверла (рис. 5.15) [32]. Для различных сверл C. Tsao показал, что с увеличением биения вершины сверла критическая осевая сила уменьшается.

Различное биение сверл, обусловленное погрешностью переточки, вызывает рассеяние размеров и увеличение степени расслаивания при одной и той же осевой силе. Установлено, что величина

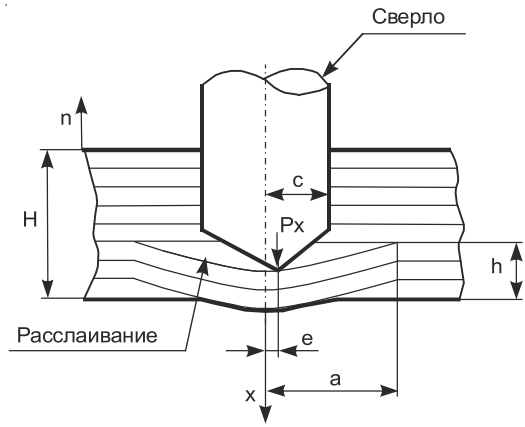



**Рис. 5.15.** Схема к оценке влияния биения сверла на критическую осевую силу при сверлении ВПКМ [135]

эксцентриситета сверла влияет на осевую силу, а, следовательно, на степень расслаивания и качество обработанной поверхности почти пропорционально [56, 135]. Поэтому большое внимание должно быть уделено процессам заточки и переточки сверл, а также закреплению сверл в шпинделе станка или ручной машины с обеспечением при этом минимального биения инструмента.

### 5.5.4. Влияние материала матрицы и формы армирования

Разнородность ВПКМ, состоящего из твердых абразивных слоев и мягкой матрицы, в каждом конкретном случае усложняет выбор оптимальных режимов резания. Материал матрицы, форма армирования и особенно объемное содержание волокон влияют на расслаивание посредством изменения в процессе резания фактической осевой силы $P_x$ и критической осевой силы $[P_x]$.

В работах [32, 136] показано, что свойства матрицы и технология производства ВПКМ влияют на качество поверхности после механической обработки. Например, у пластин, изготовленных путем сплавления в автоклаве, при прочих равных условиях возникает меньше повреждений, чем у пластин, изготовленных в печи.

При сверлении стеклопластиков осевая сила увеличивается с увеличением объемной доли волокон. Увеличение скорости резания при сверлении поперечных (*cross-winding*), тканевых (*woven*) и штапелированных (*chopped*) ВПКМ уменьшает расслаивание наружных волокон (у поверхности входа режущего инструмента) в результате уменьшения осевой силы. Осевые силы при сверлении ленточных (*continues-winding*) ВПКМ в три раза больше, чем при сверлении поперечных ВПКМ. У штапелированных ВПКМ расслаивание наружных волокон у поверхности врезания меньше, чем у тканевых. Для одной и той же формы волокнистого наполнителя расслаивание наружных волокон у поверхности врезания (входа) и расслаивание наружных волокон у поверхности выхода у тканевых ВПКМ на эпоксидной основе ниже, чем у ВПКМ на полиэстеровой основе [62, 137], несмотря на то что эти два композиционных материала обрабатываются с приблизительно одинаковыми осевыми силами.

По данным U. A. Khashaba [62], для одного и того же типа матрицы (полиэстер), хотя штапелированные ВПКМ и имеют большую осевую силу, чем тканевые, у них возникает меньшее расслаивание наружных волокон у поверхности врезания, чем у поперечных ВПКМ

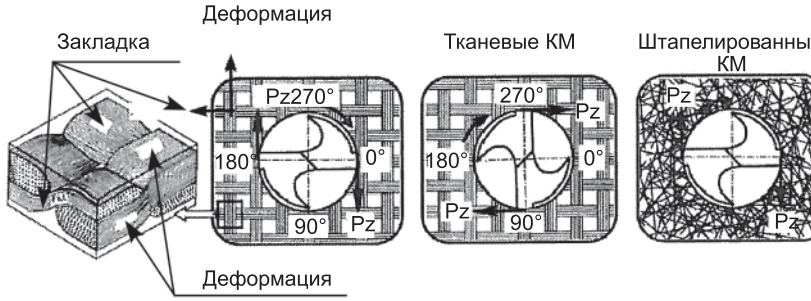



**Рис. 5.16.** Схематические диаграммы, показывающие влияние направления волокон на касательные силы резания при сверлении ВПКМ с различными схемами армирования [62]

(рис. 5.16а). Это, в принципе, противоречит прямой зависимости между осевой силой и расслаиванием. И, наоборот, крутящий момент тканевых эпоксидных КМ выше, чем при сверлении штапелированных полиэстеровых КМ. Это является следствием перпендикулярности волокон (плетения) и (наполнения) в тканевых КМ. В результате при работе сверла за один оборот режущие кромки срезают волокон в четырех направлениях, касательных к расположению волокон: два волокна (плетения) под углом относительно режущей кромки, равным 0° и 180° (рис. 5.16в), и два волокна (наполнения) под углом относительно режущей кромки, равным 90° и 270 ° (рис. 5.16б). Эти волокна в момент резания находятся под действием сжимающей нагрузки, что приводит к возникновению при сверлении пропитанных эпоксидной смолой тканевых КМ большего крутящего момента, чем у штапелированных КМ, которые считаются квазиизотропными материалами (рис. 5.16г).

## Выводы

Обобщая изложенное, можно сделать такие выводы:

1. Для процесса сверления отверстий в пакетах ВПКМ/металл характерно наличие противоречивых условий оптимального резания различных материалов в одном процессе. Так, для обеспечения требуемой стойкости режущего инструмента и качества поверхности

при сверлении слоя ВПКМ необходимы высокая скорость резания и малая подача, в то время как для обеспечения требуемой стойкости режущего инструмента и качества поверхности при сверлении, например, слоя титанового сплава необходимы низкая скорость резания и большая подача.

2. Процесс сверления смешанного пакета ВПКМ/металл в общем случае включает семь этапов:
   1) вход поперечной кромки сверла в ВПКМ;
   2) начало врезания главных режущих кромок в ВПКМ;
   3) полное врезание главных режущих кромок в ВПКМ;
   4) начало контакта перемычки с металлом;
   5) вход перемычки в металл;
   6) вход главных режущих кромок в металл;
   7) удаление остатков стружки, формирование заусенца.
3. Осевая сила и крутящий момент максимальны при прохождении сверла через металлический слой. Величина осевой силы и крутящего момента при сверлении металлического слоя, как правило, в 2–3 раза больше, чем при сверлении слоя ВПКМ.
4. Сверление смешанных пакетов ВПКМ/металл сопряжено с избыточным выделением тепла в зоне резания по причине высокой температуры обработки металлов и плохого отвода тепла из зоны резания, связанного с низкой удельной теплопроводностью титанового сплава и ВПКМ. Как следствие, возникает быстрый износ инструмента и повреждение отверстия стружкой в слое ВПКМ. Решением является применение техники минимальной смазки (MQL), охлаждение жидким азотом, СОЖ на основе спирта, новые инструментальные материалы и пониженные режимы резания.
5. При сверлении смешанных пакетов ВПКМ/металл выделяют два основных механизма изнашивания – механический и термохимический. В некоторых случаях наиболее неблагоприятным является сочетание абразивного, адгезионно-усталостного и химического видов изнашивания, возникающего при обработке пакета ВПКМ/титановый сплав/алюминиевый сплав. Критерием износа при сверлении смешанных пакетов является увеличение радиуса округления режущей кромки более пяти диаметров волокна. Снижение интенсивности изнашивания может быть достигнуто за счет выбора рациональных инструментальных материалов, геометрии инструмента и режимов сверления, которые способству-

ют уменьшению времени контакта сверла с заготовкой.

6. При сверлении смешанных пакетов ВПКМ/металл величина расслаивания определяется принятыми режимами резания, величиной износа инструмента, его геометрическими параметрами и конструкцией, матрицей и формой армирования ВПКМ.
7. Существенное влияние на расслаивание ВПКМ оказывает износ поперечной режущей кромки, который приводит к повышению $P_x$. Из геометрических параметров сверла наибольшее влияние на расслаивание оказывает угол при вершине 2φ.

РАЗДЕЛ 6

# Инструментальное обеспечение рабочих процессов обработки отверстий в волокнистых полимерных композиционных материалах

## 6.1. Особенности применения современных инструментальных материалов

Инструментальные материалы для механической обработки отверстий в однородных и смешанных пакетах, содержащих ВПКМ, должны удовлетворять ряду специфических требований [12, 28, 71]. В первую очередь они должны:

- обеспечивать высокое сопротивление абразивному износу контактных поверхностей лезвия;
- иметь низкий коэффициент трения в паре с обрабатываемым материалом;
- обладать высокими теплостойкостью и теплопроводностью.

Сопротивление лезвия абразивному износу является одним из наиболее важных требований, так как образование площадок износа на контактных поверхностях лезвия сопровождается потерей остроты режущих кромок, а, следовательно, усилением силового и теплового воздействия на обрабатываемый материал, что может вызвать существенные повреждения в композиционном материале и снижение качества отверстий.

В настоящее время в авиационной промышленности для обработки отверстий в однородных и смешанных пакетах, содержащих ВПКМ, применяются:

- *быстрорежущие стали* (БР). Из-за плохого сопротивления абразивному изнашиванию, а следовательно, и относительно низкой стойкости БР стали используются для сверления ВПКМ весьма редко [28, 107]. Интенсивное изнашивание БР инструментов усложняет

срезание волокон, в результате чего часто наблюдается их вырывание из матрицы и расслаивание. Поэтому БР стали для сверления ВПКМ используются в основном в случаях малых серий для обработки отверстий с невысоким качеством поверхностей, т.е. для обработки отверстий с относительно невысокими требованиями к их качеству. Чтобы повысить режущую способность инструментов на основе БР на эти инструменты часто наносят покрытия методом PVD в виде тонких (толщиной 1–5 мкм) пленок твердых соединений, главным образом, TiN, TiCN, TiAlN и AlCrN. Следует отметить, что даже БР инструменты с покрытием, как правило, не обеспечивают требуемого качества обработки, поскольку в процессе резания покрытие быстро удаляется с рабочих поверхностей и радиус округления режущих кромок также быстро увеличивается [28];

- *твердые сплавы* (ТС). ТС значительно превосходят БР стали по сопротивлению абразивному изнашиванию. Это особенно характерно для мелкозернистых (М) и особо мелкозернистых (ОМ) ТС на основе карбидов WC, TiC и/или TaC;
- *поликристаллический алмаз* (ПКА). ПКА имеет наибольшее сопротивление абразивному изнашиванию, но является чрезвычайно хрупким материалом. Поэтому он с целью уменьшения вероятности хрупкого разрушения режущего элемента (пластины) используется вместе с подложкой из БР стали или ТС;
- *кубический нитрид бора* (КНБ). КНБ при резании ВПКМ уступает ПКА в износостойкости и в силу своей относительно высокой стоимости используется для обработки этих материалов сравнительно редко. Более того, его повышенная хрупкость, обусловленная низкой вязкостью, чаще всего требует применения отрицательных передних углов, что в связи с ростом сил резания при обработке ВПКМ нежелательно;
- *керамика*. Характеризуется относительно высоким сопротивлением абразивному изнашиванию. Вместе с тем для обработки ВПКМ из-за низкого сопротивления ударным нагрузкам и восприимчивости к тепловому удару в настоящее время применяется еще сравнительно редко.

На рис. 6.1 представлено сравнение кривых износа резцов из различных инструментальных материалов при точении углепластика [71]. Самую низкую интенсивность изнашивания инструмента при его обработке, если отсутствуют выкрашивания или сколы, обеспечивает ПКА. Несколько большая интенсивность изнашивания наблюдается

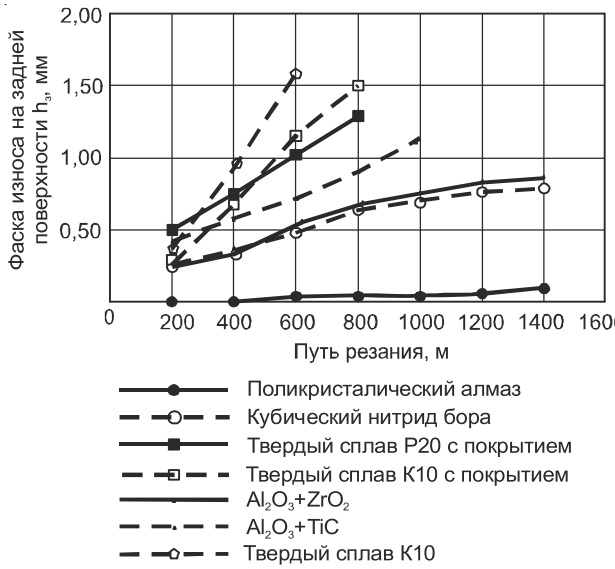



**Рис. 6.1.** Кривые износа различных инструментальных материалов при точении углепластика [71]

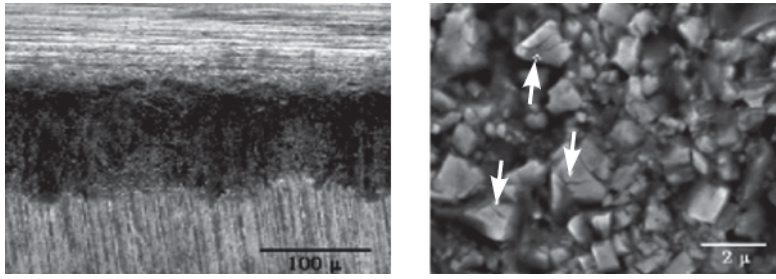
при такой обработке инструментами из КНБ и керамики на основе $Al_2O_3$ и еще большая – из твердых сплавов.

Работоспособность инструментов из различных инструментальных материалов в значительной степени зависит от вида инструмента, обрабатываемого материала, метода и условий обработки. Именно поэтому в технической литературе информация об изнашиваемости одного и того же инструментального материала при обработке ВПКМ по сравнению с другими довольно часто выглядит противоречиво. Например, по данным [39, 124], инструментальные материалы, используемые при обработке ВПКМ, можно расположить (по убыванию стойкости инструментов) в следующем порядке: ПКА, однокарбидные ТС К10, К20, М10, Р20, черная керамика, белая керамика, двух- и трехкарбидные ТС, БР сталь.

Следует отметить, что в данной работе основное внимание уделено инструментам, изготавливаемым из твердых сплавов и поликристаллических алмазов, которые в настоящее время при обработке в процессе сборки летательных аппаратов отверстий в однородных и смешанных пакетах, содержащих ВПКМ, получили наибольшее применение.

### 6.1.1. Твердые сплавы

Абразивное изнашивание ТС при резании ВПКМ происходит путем перемещения кобальтовой связки, которое сопровождается фрагментацией или разрушением и вырыванием зерен карбидов, содержащихся в данном твердом сплаве. Такой механизм образования площадок изнашивания на лезвиях из твердых сплавов (рис. 6.2а), имеющий две стадии, часто называют «мягким истиранием» [71, 104]. На первой стадии под действием твердой абразивной фазы, содержащейся в ВПКМ, кобальтовая связка частично удаляется из межзеренного карбидного пространства твердого сплава комбинацией пластической деформации и микроистирания. После удаления значительной части связки с контактного участка рабочей поверхности инструмента наступает вторая стадия его износа, характеризующаяся перемещением карбидных зерен, их разрушением и отрывом от этого участка поверхности. Кроме того, срезанные микрофрагменты твердой абразивной фазы ВПКМ могут задерживаться на поверхности контакта инструмента со стружкой и заготовкой и способны проникать между зернами карбидов и разрушать кобальтовую связку микроистиранием даже на некотором расстоянии от поверхности, т.е. «в глубине», чему в значительной степени может способствовать «раскачивание» зерен карбидов под действием сил, сильно изменяющихся в связи с неоднородностью обрабатываемого материала. Это, в свою очередь, также приводит к частичному «выталкиванию» связки к поверхности, где она удаляется при взаимодействии лезвия с поверхностями заготовки. Кроме того,




а) б)

**Рис. 6.2.** Фотографии поверхности износа однокарбидного твердого сплава с содержанием Co 6%: а – общий вид площадки износа на задней поверхности лезвия; б – микроструктура поверхностного слоя площадки износа с пустотами и зернами WC с трещинами на них (указаны стрелками) [71]

движение хрупких зерен карбидов приводит и к развитию как межзеренных, так и внутризеренных (рис. 6.2б) трещин, что, в конце концов, сопровождается разрушением и перемещением целого зерна или его частей с образованием относительно больших пустот.

Вследствие абразивного механизма изнашивания инструментов из твердого сплава при резании ВПКМ влияние скорости резания на износ инструмента в зависимости от условий обработки и свойств ВПКМ может быть как незначительным, так и иметь экстремальный характер, что связано с изменением температуры резания. Например, при резании одних углепластиков со скоростью меньше 200 м/мин износ ТС инструмента практически не зависит от скорости резания, но зависит от суммарной длины срезанного волокнистого наполнителя ВПКМ [124], в то время как при резании других углепластиков наибольшая интенсивность изнашивания твердого сплава группы К10 наблюдается при скорости резания уже 40 м/мин [138].

Для обработки ВПКМ чаще всего используют мелкозернистые однокарбидные ТС, поскольку они сочетают в себе наилучшее соотношение износостойкости и прочности. Считается, что наилучшим ТС для сверления углепластиков являются однокарбидные твердые сплавы группы К20/N15, например, Н13А (табл. 6.1). Они могут обеспечить малый радиус округления режущей кромки (7–12 мкм) в течение длительного времени [39, 64, 89].

Двух- и трехкарбидные ТС имеют повышенное содержание γ-фазы (карбидов TiC, TaC, NbC) (табл. 6.1) по сравнению с однокарбидными ТС, несмотря на то что двух- и трехкарбидные ТС и были разработаны для обеспечения благоприятного баланса износостойкости и прочности в условиях, когда возникают высокие температуры. Однако из-за относительно низких температур при резании ВПКМ эти твердые сплавы не проявляют своих преимуществ и показывают меньшую стойкость, чем однокарбидные ТС. Например, при прямоугольном резании стеклопластика – средняя величина силы резания инст-

**Таблица 6.1.** Химический состав некоторых твердых сплавов Sandvik Coromant [28]

| Марка | Содержание Co, % | Содержание TiC + TaC, % | Содержание WC, % | Группа применения |
|---|---|---|---|---|
| H13A | 6 | 0 | 94 | K20/N15 |
| S1P | 10 | 22 | 68 | P10/S15 |
| S6 | 11,7 | 5,5 | 82,8 | P40 |

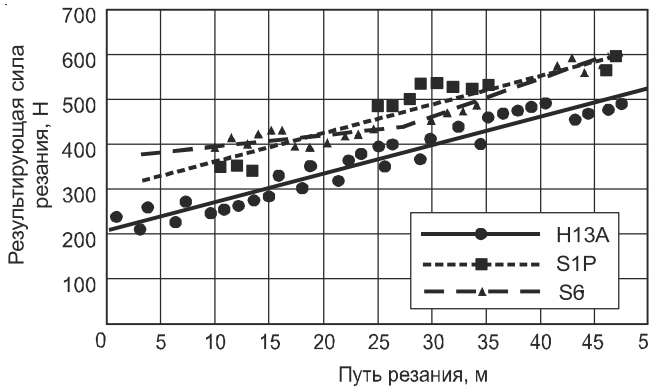



**Рис. 6.3.** Изменение результирующей силы резания в процессе прямоугольного резания стеклопластика различными твердыми сплавами [28]: $V$ = 60 м/мин; $S$ = 0,2 мм/об; $\gamma$ = 15°

рументами из трехкарбидного ТС марок S6 и SIP (табл. 6.1), возрастающая с увеличением пути резания приблизительно на 100 Н выше, чем при резании инструментом из однокарбидного твердого сплава марки Н13А (рис. 6.3). Это свидетельствует о большей интенсивности изнашивания инструментальных материалов марок S6 и S1P, чем твердого сплава марки Н13А в указанных условиях обработки.

## 6.1.2. Поликристаллический алмаз

Многочисленными исследованиями [28, 71, 139] и др. доказано при резании ВПКМ превосходство по стойкости и производительности инструментов на основе поликристаллического алмаза над ТС инструментами. Например, M. Ramulu [28] показал, что при прочих равных условиях интенсивность изнашивания поликристаллического алмаза в 120 раз меньше, чем однокарбидного твердого сплава.

Алмаз имеет идеальные свойства для того, чтобы эффективно обрабатывать ВПКМ. С одной стороны, его высокая твердость обеспечивает по сравнению с другими инструментальными материалами наибольшее сопротивление абразивному изнашиванию. С другой стороны, его высокая химическая стабильность и малое взаимодействие с полимерами и цветными металлами предотвращают формирование нароста на режущем лезвии и обеспечивают высокоэффективное резание.

При резании однородных ВПКМ с малыми подачами доминирующим механизмом изнашивания алмазных инструментов является равномерное абразивное изнашивание, механизм которого подобен механизму изнашивания твердосплавного инструмента (см. п. 6.1.1). В начальной стадии резания площадки износа на поверхностях (передней и задних) лезвия из поликристаллического алмаза образуется в результате отрыва от их участков, контактирующих со стружкой и поверхностями на заготовке, слабо удерживающихся зерен. При этом на площадке износа формируются борозды вследствие абразивного воздействия твердых частиц, находящихся в обрабатываемом материале, ориентированные в направлении схода стружки (на передней поверхности) и главного движения резания (на задних поверхностях). Следует отметить, что изменение передней поверхности значительно меньше, чем изменение задних поверхностей. Поверхность площадки износа в отличие от остальной части соответствующей поверхности лезвия перестает быть однородной, что способствует увеличению динамических нагрузок и приводит в конечном итоге к микровыкрашиванию режущей кромки и ее сколам.

При резании с большими подачами, при прерывистом резании и неравномерном распределении припуска в процессе обработки доминирующими механизмами изнашивания алмазных инструментов являются микровыкрашивание. При избыточных нагрузках возможны сколы, которые могут вызывать серьезные повреждения режущей кромки [71].

Для равномерных процессов резания ВПКМ характерно уменьшение интенсивности изнашивания с увеличением размера зерна поликристаллического алмаза. С другой стороны, в прерывистых процессах, как, например, фрезерование, мелкозернистый поликристаллический алмаз показывает большую стойкость, поскольку менее восприимчив к микровыкрашиванию режущей кромки и дольше сохраняет ее остроту [71, 118].

### 6.1.3. Эффект от применения покрытий

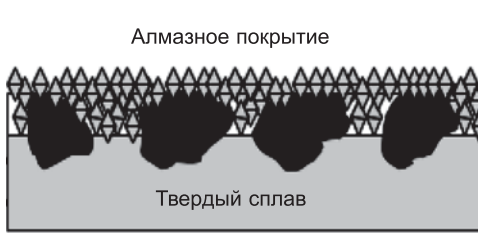
Повышение режущей способности инструментов при резании ВПКМ может быть достигнуто за счет нанесения на их рабочие поверхности износостойких покрытий. Этот метод в настоящее время широко применяется для инструментов, используемых при обработке металлов и сплавов. Как правило, используются CVD- и PVD-покрытия на осно-

ве TiC, TiN, $TiB_2$, TiCN, TiAlN, TiAlON, AlCrN и др. [175]. Это могут быть одно- или многослойные покрытия общей толщиной, как правило, не более 15 мкм. Вместе с тем, если при обработке металлов и сплавов такие покрытия существенно повышает работоспособность инструментов, то их применение при резании ВПКМ не дает существенного увеличения стойкости инструментов из-за невозможности сохранения при нанесении покрытия и во время работы малого радиуса округления режущей кромки инструмента [12, 28].

При резании ВПКМ наибольший эффект показали ультратвердые алмазные покрытия, наносимые на твердосплавную подложку, за счет своей высокой твердости, малого коэффициента трения и высокой теплопроводности. Различными методами, например CVD, возможно создание тонких (DLC) и толстых (veined PCD) алмазных покрытий. Толщина тонких покрытий составляет от 0,001 до 10 мкм, толщина толстых покрытий может достигать нескольких миллиметров. Преимущество алмазных покрытий по сравнению с поликристаллическими алмазами состоит в их способности принимать любую геометрическую форму инструмента. Поэтому эти покрытия могут быть нанесены на геометрически сложные инструменты, такие, как фрезы, сверла и пластины со стружколомающими канавками.

Для алмазных покрытий, нанесенных методом CVD, существует проблема создания необходимых сил адгезии между покрытием и подложкой при практических применяемых режимах резания [71]. Это частично вызвано большими остаточными напряжениями в пленке и подложке, которые возникают в процессе создания покрытия. Из-за разницы в коэффициентах теплового расширения алмазной пленки и подложки ($\alpha_D = 2{,}85 \cdot 10^{-6}\,°C^{-1}$ для алмазного покрытия и $\alpha_S = 5{,}0 \cdot 10^{-6}\,°C^{-1}$ для твердосплавной подложки) и высоких температур, требуемых для процесса CVD (600–1000 °C), при охлаждении в покрытии и подложке возникают большие термические остаточные напряжения. Эти напряжения совместно с механическими напряжениями, возникающими при резании, могут даже сопровождаться для инструментов с алмазным покрытием снижением стойкости. Опыт некоторых изготовителей покрытий показал, что наилучшие результаты получаются при использовании в качестве подложки твердого сплава с содержанием кобальта менее 10%, содержащего зерна с размерами 0,5 мкм и 3 мкм (рис. 6.4) [28, 140].

Толстое алмазное покрытие формируется на заготовке инструмента, после чего она может при необходимости шлифоваться для придания инструменту окончательных формы и геометрии. На рабочих



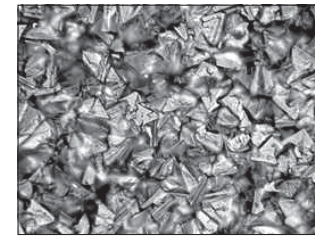



**Рис. 6.4.** Алмазное покрытие [28]

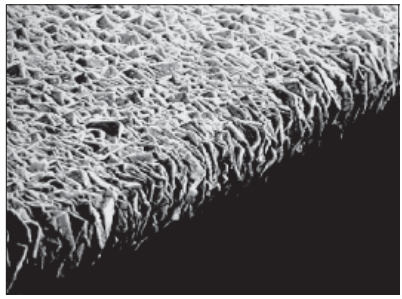


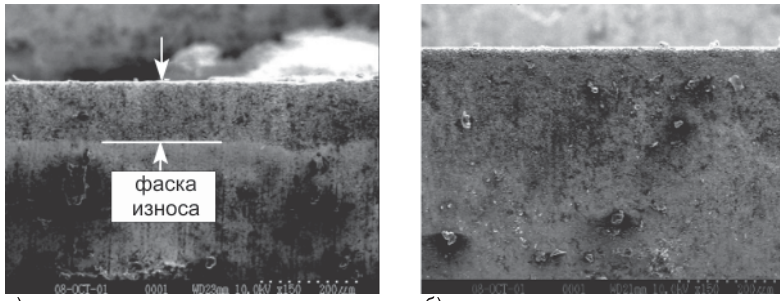
**Рис. 6.5.** Режущая кромка сверла с толстым алмазным покрытием [140]

поверхностях лезвий инструментов, особенно около режущих кромок, создается развитая «граненая» структура алмазов (рис. 6.5), которая выгодно отличает эти инструменты от шлифованных твердосплавных инструментов и инструментов из ПКА.

Такое «гранение» способствует уменьшению сил резания и повышению качества обработанной поверхности.

При отсутствии преждевременного разрушения и сколов режущей кромки износостойкость инструментов с алмазным покрытием при резании ВПКМ определяют однородное изнашивание и отслаивание алмазной пленки под действием растягивающих напряжений. Если алмазное покрытие имеет хорошую адгезию с подложкой, то инструменты обычно показывают значительно более высокую стойкость по сравнению с инструментами без покрытия (рис. 6.6).

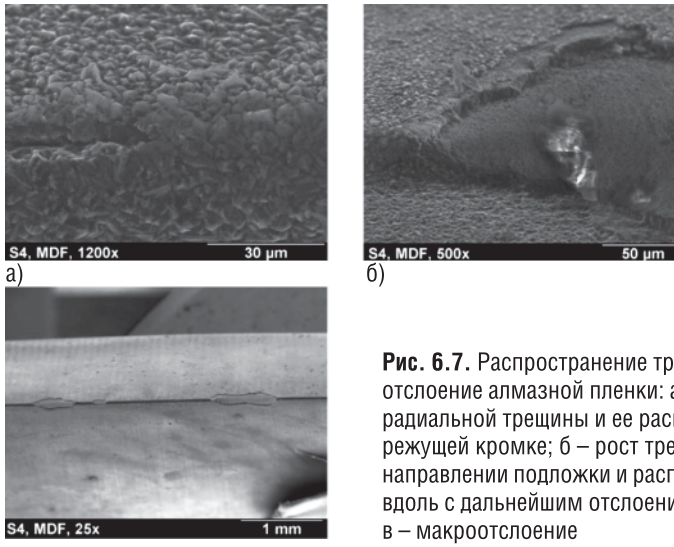
Изнашивание также может происходить путем постепенного сглаживания и отрыва алмазных зерен, что способствует уменьшению толщины алмазной пленки. Это, в свою очередь, приводит к образованию трещин и отделению пленки от подложки. Когда алмазная пленка полностью удаляется с поверхности в каком-то месте подложки, интенсивность изнашивания в этом месте повышается, и изнашивается уже как алмазная пленка, так и подложка. Если адгезия между пленкой и подложкой недостаточна или остаточные напряжения в




а) б)

**Рис. 6.6.** Износ по задней поверхности твердосплавного инструмента без покрытия (а) и с алмазным покрытием (б) после одного и того же пути резания при обработке ДВП средней плотности

пленке чрезмерно велики, на режущей кромке происходит локализованный разрыв покрытия в форме радиальной трещины (рис. 6.7а). В условиях больших сжимающих напряжений в пленке трещина проходит через покрытие и движется в направлении подложки до его границы. Эта трещина вызывает макроотслаивание алмазной пленки от покрытия (рис. 6.7б, в).




а) б)

в)

**Рис. 6.7.** Распространение трещины и отслоение алмазной пленки: а – начало радиальной трещины и ее распространение в режущей кромке; б – рост трещины в направлении подложки и распространение вдоль с дальнейшим отслоением пленки; в – макроотслоение

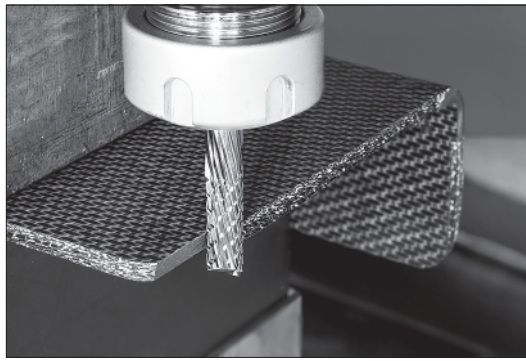


**Рис. 6.8.** Монолитная фреза EPN-F компании ISCAR с алмазным покрытием для обработки углепластиков

Особую эффективность алмазные покрытия показывают в сочетании с оптимальной геометрией инструмента. Так, например, в стремлении добиться значительного повышения износостойкости кромки специалисты компании ISCAR сконструировали монолитную фрезу EPN-F (рис. 6.8) с углом наклона зуба 15° (направление спиральной стружечной канавки – левое), показавшей хорошие результаты при обработке углепластиков и композитов с сотовым наполнителем. Особенностью фрезы, производимой из ультрамелкозернистого твердого сплава с алмазным покрытием, является разделение зуба на секции, причем размеры секций в направлениях вдоль зуба и перпендикулярно ему находятся между собой в заданном соотношении. Таким образом достигается лучшее распределение нагрузок на фрезу и обрабатываемую заготовку, следствием которого становится и повышение стойкости, и улучшение качества обработанной поверхности.

Алмазное покрытие в паре с «шевронной» конструкцией фрезы EPX компании ISCAR обеспечивает высокую эффективность обра-

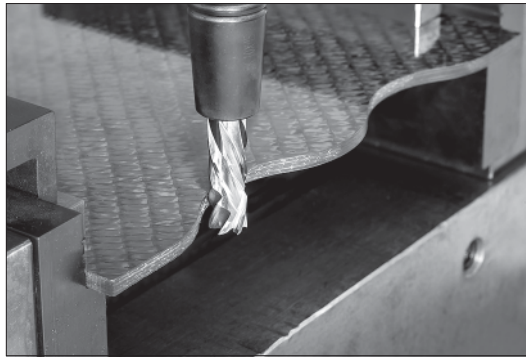


**Рис. 6.9.** Монолитная фреза EPX компании ISCAR с алмазным покрытием для обработки углепластиков с большой шириной среза

ботки с большой шириной среза (рис. 6.9). Сочетание правого и левого углов наклона зуба уравновешивает осевые составляющие силы резания, улучшает отвод стружки, уменьшает вибрационные нагрузки на зубья фрезы и в конечном итоге обеспечивает получение качественных верхней и нижней кромок обрабатываемой детали.

## 6.2. Обрабатываемость аэрокосмических материалов

Описанные ранее особенности резания различных конструкционных материалов, применяемых при производстве летательных аппаратов (ВПКМ, алюминиевые и титановые сплавы и др.), показывают, что только титановые сплавы, обработка которых сопровождается высокими силами и температурами резания, имеют обрабатываемость ниже, чем обрабатываемость ВПКМ (табл. 6.2).

Для получения высокого качества обработанной поверхности при резании ВПКМ необходимо поддержание высокой остроты режущей кромки и малой осевой силы. Эти требования крайне тяжело выполнить из-за высокой интенсивности абразивного изнашивания, которое приводит к быстрому увеличению радиуса округления режущей кромки $r$. При резании ВПКМ величина $\rho$ является одним из наиболее объективных критериев износа инструментов. Выбираемые в конкретных технологических операциях геометрия режущего инструмента, инструментальный материал, покрытие, режим резания и метод охлаждения являются своеобразным компромиссом между производительностью обработки, качеством обработанной поверхности и себестоимостью.

Отмеченные ранее особенности изнашивания, преимущественно абразивного, делают невозможным, в отличие от обработки титановых и алюминиевых сплавов, применение для обработки ВПКМ быстрорежущих инструментов. В реальном сборочном производстве летательных аппаратов приемлемые показатели резания обеспечиваются применением однокарбидных твердых сплавов или поликристаллических алмазов. Опыт показал, что традиционные CVD- и PVD-покрытия, наносимые на режущие инструменты для обработки ВПКМ, не дают заметного повышения их эффективности. В отличие от этих покрытий алмазные покрытия обеспечивают значительно более высокую износостойкость инструментов даже с весьма сложной геометрией. Разработанные к настоящему времени технические решения по созданию надежных адгезионных связей алмазных

**Таблица 6.2.** Сравнительная характеристика обрабатываемости аэрокосмических материалов

| Характеристика | | Титановые сплавы | Алюминиевые сплавы | ВПКМ |
|---|---|---|---|---|
| Однородность свойств | | изотропные | изотропные | ярко выраженная анизотропия |
| Предел прочности при растяжении, МПа | | 500–1100 | 470–750 | 42/1300 |
| Модуль упругости, ГПа | | 110–115 | 70–75 | 7/134 |
| Причины отказов инструмента | | диффузионное растворение, абразивное изнашивание и пластическая деформация режущей кромки | механическое изнашивание в результате наростообразования, адгезионно-усталостный механизм изнашивания и диффузионное растворение | абразивное изнашивание, скол режущей кромки, микроразрушение или выкрашивание, химическая и электрохимическая коррозия, окисление |
| Рекомендуемый инструментальный материал | | ТС К20 | ПКА, ТС, БР | ТС К10/К20, ПКА |
| Рекомендуемое покрытие | | TiAlN алмазное | TiN, TiCN, алмазное | алмазное |
| Рекомендуемый передний угол, ° | | 5–15° | 0–40° | 0–10° |
| Рекомендуемый задний угол, ° | | 5–10° | 6–10° | 5–8° |
| Рекомендуемый радиус округления режущей кромки ρ, мкм | | – | – | 7–12 |
| Диапазон рекомендуемых скоростей резания ТС инструментом, м/мин | точение | 80–120 | 30–150 | 50–250 |
| | сверление | 20–60 | около 90 | 40–60 |
| | фрезерование | 40–60 | 90–175 | 25–70 |
| Диапазон рекомендуемых подач ТС инструментом, мм/об | точение | 0,2–0,3 | 0,13–0,51 | 0,05–0,3 |
| | сверление | 0,16–0,30 | около 0,2 | 0,02–0,05 |
| | фрезерование | около 0,2 | 0,1-0,3 | 0,075-0,13 |
| Рекомендации по охлаждению | | эмульсия под давлением | эмульсия | эмульсия |
| Возможность сухого резания | | возможно при использовании ПКА и алмазных покрытий | | |

покрытий с твердосплавной подложкой способствуют росту их использования для сверл, фрез и многогранных неперетачиваемых пластин со стружколомающими канавками.

## 6.3. Инструменты для обработки отверстий

Среди всех описанных ранее рабочих процессов обработка резанием осевым инструментом в современном сборочном производстве летательных аппаратов является наиболее применяемой. Особенности резания ВПКМ, описанные в разделах 2 и 3, требуют применения специальных конструкций инструментов для обеспечения необходимого качества, обработанных отверстий и эффективности процесса резания. Ниже рассмотрены основные тенденции в совершенствовании конструкций осевых режущих инструментов.

### 6.3.1. Сверла

#### 6.3.1.1. Конструкции цельных сверл

Наиболее распространенными являются инструменты, предназначенные для обработки отверстий в сплошном материале, – сверла. Необходимая конструкция сверла и технология сверления в значительной степени зависят от обрабатываемых материалов. Например, волокна углерода и арамида при их механической обработке ведут себя по-разному, что требует применения различных конструкций сверл и технологии обработки. Кроме того, обработка смешанных пакетов из ВПКМ/металл требуют также различных режущих инструментов и технологий, отличных от тех, которые применяются при обработке раздельно ВПКМ и металла. Вместе с тем накопленный к настоящему времени опыт свидетельствует о том, что, с одной стороны, при сверлении смешанных пакетов ВПКМ/металл геометрия сверла, независимо от свойств ВПКМ, чаще всего определяется обрабатываемым металлом, а не ВПКМ, и поэтому, как правило, при сверлении таких пакетов используются стандартные спиральные сверла. С другой стороны, стандартные конструкции сверл с геометрическими параметрами и конструкцией режущей (рабочей) части, рекомендуемыми для металлов, практически не могут обеспечить качественную обработку отверстий как в однородных ВПКМ, так и в пакетах, содержащих их, с требуемыми производительностью и затратами. Поэтому необходимость обеспечения высокого качества отверстий в сочетании с высокой производительностью и низкой удельной себестоимостью обработки деталей из ВПКМ и пакетов из них потребовала как модернизации существующих (традиционных) конструкций сверл за счет оптимизации их геометрических параметров, так и создания новых конструкций режущих

(рабочих) частей сверл и принципов их действия [32]. Основные тенденции изменения конструкций режущих (рабочих) частей сверл и их геометрии направлены на уменьшение осевой силы и/или смещение центра ее действия от центра отверстия [118, 132].

Существует две большие группы сверл – с работающей поперечной режущей кромкой (спиральные, перовые, пирамидальные) и без нее (кольцевые и трубчатые) ([41, 47, 50, 64, 116, 128, 141, 142] и др.). Наличие участвующей в рабочем процессе поперечной режущей кромки обеспечивает центрирование сверла и, соответственно, требуемую точность обработки, но увеличивает осевую силу. Отсутствие поперечной режущей кромки значительно (до 50% и больше) уменьшает осевую силу, но существенно ухудшает центрирование сверла [71, 112], что, как правило, сопровождается снижением точности размера и формы изготавливаемого отверстия.

**Спиральные сверла** (*twist drill*) являются универсальным осевым инструментом (рис. 6.10а). Для обработки ВПКМ на станках с ЧПУ с автоматической подачей и с помощью ручных машин применяют спиральные сверла с особыми формами заточки, обеспечивающие уменьшение осевой силы и повышение стойкости инструмента [41].

Повышение точности центрирования сверл при работе ручным инструментом достигается применением перовых (*Straight drill*) (рис. 6.10б) [29] и пирамидальных (*Dagger Drill, Tripod drill*) сверл (рис. 6.10в).

**Перовые сверла** применяются для сверления ВПКМ ручным инструментом. Их конструкция позволяет обеспечить хорошее центрирование и минимальные расслаивание в сочетании с приемлемым стружкоотводом и высокой жесткостью, обеспечивающей более высокую точность формируемого отверстия.

**Пирамидальные сверла** показали хорошие результаты при сверлении ВПКМ на основе графита. Вместе с тем из-за его относительно «длинной» и острой вершины со сравнительно малыми значениями угла в плане 2φ применение таких сверл невозможно в ситуациях с ограниченным пространством со стороны выхода из заготовки. Кроме того, для этих сверл характерны усложненный отвод стружки в связи с отсутствием стружкоотводящих канавок и относительно низкая стойкость инструмента. Пирамидальные сверла с двумя и четырьмя гранями разработаны специально для сверления пакетов ВПКМ на основе углерода. Например, пирамидальные сверла с двумя гранями обеспечивают возможность увеличения частоты вращения от 2000–3000 об/мин, принятых для спиральных сверл, до 18 000–20 000 об/мин за счет их лучшего центрирования [12].

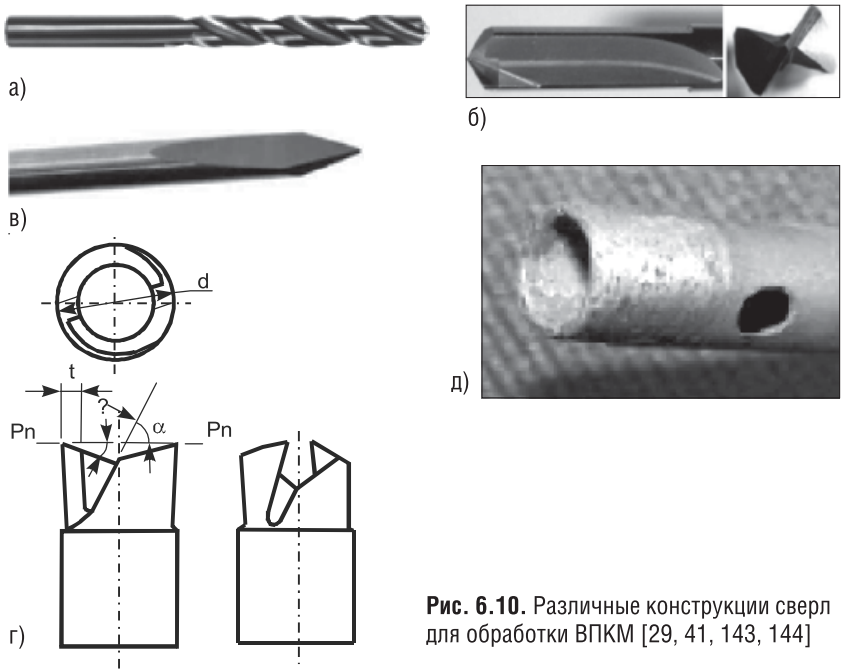



**Рис. 6.10.** Различные конструкции сверл для обработки ВПКМ [29, 41, 143, 144]

**Кольцевое сверло** (*Trepanning drill*) имеет режущие кромки лишь на периферии режущей части (рис. 6.10г). Это обеспечивает резание только торцевой частью инструмента. Такой принцип работы сверла значительно уменьшает изгиб волокон и, следовательно, позволяет работать с большей подачей, чем сверлами с поперечной режущей кромкой [141]. При этом обеспечивается приемлемое удаление стружки. Осевая сила при применении кольцевых сверл ниже, по крайней мере, на 50% по сравнению со спиральными сверлами. Вследствие этого значительно улучшается качество отверстий.

**Трубчатое сверло** (*core drill*) представляет собой трубу, на торце которой нанесены алмазные зерна, образующие развитую абразивную поверхность (рис. 6.10д). Трубчатое сверло в связи с весьма сложным удалением стружки из зоны обработки преимущественно применяется для сверления хрупких материалов [143, 144]. Вместе с тем при использовании таких сверл для обработки в ВПКМ отверстий большого диаметра можно избежать расслаивания обрабатываемого материла даже при значительных подачах [54, 128, 144].

### 6.3.1.2. Конструкции сборных сверл

Обрабатываемость ВПКМ резанием варьируется в зависимости от типа материала, направления укладки волокна, конструкции изделия и других факторов. Эти различия могут быть достаточно велики, что приводит к существенному возрастанию доли специализированного, изготавливаемого по специальному заказу инструмента, учитывающего специфические свойства конкретного композита. На предприятиях, занятых обработкой ВПКМ, эта особенность приводит к расширению номенклатуры применяемого инструмента и увеличению складского запаса. Инструмент для резания ВПКМ имеет высокую стоимостью, и эффективное ведение инструментального хозяйства становится важным фактором повышения рентабельности предприятия.

Одним из путей решения отмеченной проблемы является использование сборного инструмента со сменными пластинами или режущими головками. Однако конструктивно невозможно или чрезвычайно дорого выполнять сверла малого диаметра сборными. Область рационального применения сверл различных конструкций представлена в табл. 6.3. При выборе конструкции сверла для заданных конкретных условий обработки следует иметь в виду и то обстоятельство, что с увеличением диаметра сверла стоимость цельных сверл может быть больше стоимости сверл, имеющих сборную конструкцию.

**Таблица 6.3.** Область рационального применения сверл различных конструкций (по материалам компаний ISCAR [145], SECO, SANDVIK COROMANT, GUEHRING [146])

| Конструкция сверла | | Возможный диапазон *d*, мм *(l/d)* | Рациональный диапазон *d*, мм *(l/d)* | Достижимые показатели качества | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | поле допуска | Ra, мкм |
| Цельное спиральное | | 0,1–80 (5–10) | 0,1–20 (5–10) | H12 | 1,0 |
| Сборные | перовое (Spade drills) | 9–80 (2–10) | 25–80 (2–4) | H14 | 3,0 |
| | с головкой (Replaceable head) | 6,8–32 (1,5–3) | 12–25 (1,5–3) | H13 | 1,6 |
| | со сменными неперетачиваемыми пластинами (Indexable drills) | 12–80 (2–5) | 16–80 (2–5) | H13 | 2,0 |

Применение цельных сверл целесообразно до диаметра 20 мм. Сверла со сменными головками различных конструкций могут выгодно применяться в диапазоне диаметров от 12 до 26 мм. Сверла со сменными неперетачиваемыми пластинами эффективны при диаметрах более 16 мм. Сборные перовые сверла являются наиболее выгодным вариантом обработки неточных предварительных отверстий большого диаметра. Рациональное отношение $l/d$ может быть от 5 до 10 для цельных спиральных сверл, до 3–5 для сборных сверл.

**Сборные перовые сверла** (рис. 6.11а) отличаются простотой своей конструкции.

Они являются сравнительно жесткими и могут обеспечить сверление с большими подачами. Вместе с тем перовые сверла не могут применяться на чистовых операциях и обеспечить допуск отверстий менее 0,08 мм, поскольку невозможно достаточно точно установить лезвие в корпусе сверла. Перовые сверла могут оснащаться сменными лезвиями из быстрорежущей стали, твердого сплава, керметов и даже из поликристаллического алмаза или кубического нитрида бора. Лезвия могут заменяться и/или перетачиваться.

**Сверла со сменной головкой** подобны сверлам с твердосплавными напайными пластинками и состоят из стального корпуса и хвостовика со сменной твердосплавной головкой (рис. 6.11в, г). Они обеспечивают комплексную геометрию вершины в сменной конструкции. Повторяемость настройки обычно находится в пределах 0,05 мм. Сверла со сменной головкой обеспечивают большую точность (табл. 6.4) по сравнению со сверлами со сменными неперетачиваемыми пластинами, поскольку размеры головки точно выдерживаются еще на этапе ее изготовления.

Сверла со сменной головкой работают при более высоких подачах, чем сверла со сменными пластинами. Они обеспечивают более быструю смену режущей части и надежную подачу СОЖ по сравнению со сверлами с напайными твердосплавными головками. Однако в случае малой осевой силы (например, при выходе сверла) может произойти поломка механизма крепления. В этой связи интересным является решение компании MAPAL, выпускающей сверла для обработки отверстий в ВПКМ, головки которых имеют на присоединительной части увеличенную высоту рифления (рис. 6.11г).

Показательной является система Мультимастер компании ISCAR, которая предлагает потребителю богатый выбор разнообразных конструкций головок и корпусов различной формы (хвостовиков). Головка центрируется в хвостовике по торцу и короткому конусу, используя

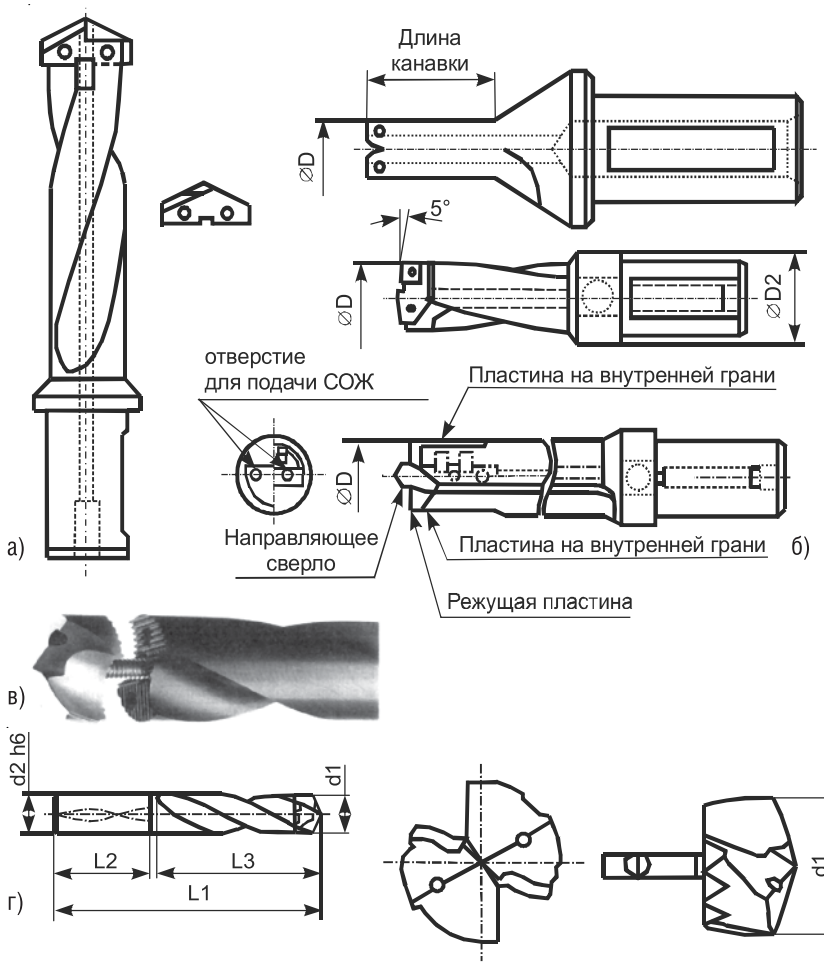



**Рис. 6.11.** Сборные сверла: а – перовое сверло; б – сверло со сменными неперетачиваемыми пластинами; в, г – сверло с неперетачиваемой головкой (по материалам компаний GUEHRING, MAPAL, SECO, ISCAR) [145, 146]

упругую деформацию корпуса в радиальном направлении в зоне сопряжения, и закрепляется посредством резьбы особого профиля. Таким образом, ограниченное количество головок и хвостовиков в комбинации друг с другом обеспечивает большое число возможных вариантов инструмента. Главным достоинством системы является

**Таблица 6.4.** Сравнение точности отверстий различных номинальных диаметров, обработанных различными типами сверл [112]

| Диаметр сверла, мм | Цельное твердосплавное сверло X3 | Сверло со сменными неперетачиваемыми пластинами L/D ? 3 | Сверло со сменными неперетачиваемыми пластинами 3<L/D < 5 | Сверло с индексируемыми пластинами * | Сверло со сменной режущей головкой X1 | Сверло со сменной режущей головкой X2 | Сверло со сменной режущей головкой X1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| <10 | – | +0,035 | +0,055 | – | – | – | – |
| <17 | +0,030 | +0,042 | +0,070 | +0,10 | +0,042 | +0,070 | 0,0 |
| <25 | +0,040 | +0,050 | +0,080 | +0,15 | +0,050 | +0,080 | +0,40 |

*Примечание.* Сверло со сменными режущими головками X1 более высокого качества, чем сверло со сменными режущими головками X2; *сверло с наибольшей зависимостью допуска получаемого отверстия от отношения L/D.

многофункциональность, операционная гибкость: возможность быстрой «настройки» на требуемую операцию или на материал заготовки за счет установки головки нужной геометрии в хвостовик оптимальной конфигурации. А замена только режущей части, но не всего инструмента в целом, в случае предельного износа приводит к рациональному использованию дорогостоящего инструментального материала.

В хвостовиках Мультимастер можно устанавливать не только цельные твердосплавные головки, но также и головки с пластинами, которые закрепляются пайкой или механически. Интересна конструкция, представленная на рис. 6.12. Собственно головка является корпусом с напайными вставками из синтетического алмаза. Режущая кромка вставок снабжена стружкоразделительными канавками, направленными на снижение силы

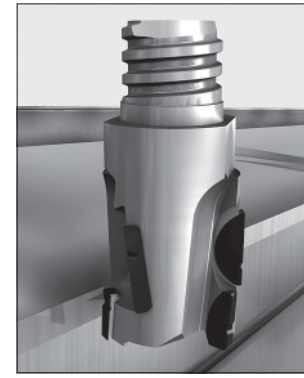


**Рис. 6.12**. Головка с напайными пластинами системы Мультимастер компании ISCAR

**Рис. 6.13**. Св ерло ICF линии SUMOCHAM компании ISCAR

резания и измельчения стружки. В результате уменьшается нагрузка на заготовку из ВПКМ и улучшается удаление стружки, что в итоге повышает качество обрабатываемой поверхности. Основное приложение головки – орбитальное фрезерование, обрезка кромок контура детали и фрезерование с врезанием под углом.

Интересным также является конструкция сверл ICF линии SUMOCHAM компании ISCAR. Сверла этой линии состоят из стального корпуса и сменной твердосплавной головки (рис. 6.13). Конструктивным принципом линии является закрепление головки силами упругости корпуса. Для сверления композитов созданы головки типа ICF..2M-C (для обработки углепластиков) и ICF..2M-C-Ti (для обработки смешанных пакетов ВПКМ/титановый сплав) (рис. 6.14). Материал головок – ультрамелкозернистый тв ердый сплав с алмазным покрытием.

Важно отметить, что в данной линии (как и Мультимастер) замена изношенной головки не требует дополнительной подстройки на

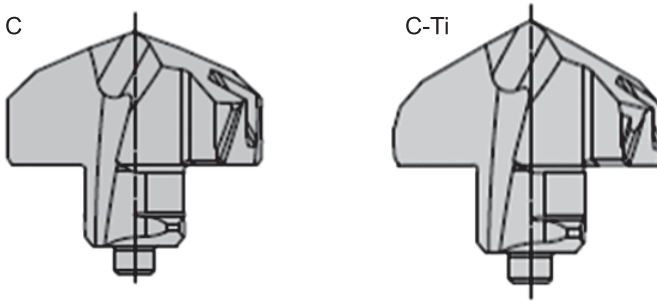



**Рис. 6.14**. Головки ICF…2M-C (для обработки углепластиков) (*а*) и ICF…2M-C-Ti (для обработки смешанных пакетов ВПКМ/титановый сплав) (б)

размер, так как вылет головки колеблется в очень жестких пределах. Следовательно, смена головки может производиться непосредственно на станке, а так как сам процесс смены прост и быстр, то он практически не приводит к нежелательному простою дорогостоящего металлорежущего оборудования и открывает дополнительные резервы снижения вспомогательного времени.

**Сверла со сменными неперетачиваемыми пластинами (ССНП)** (рис. 6.11б) могут использоваться и для сверления, и для рассверливания отверстий. Одно и то же сверло такой конструкции может использоваться для обработки различных материалов за счет применения

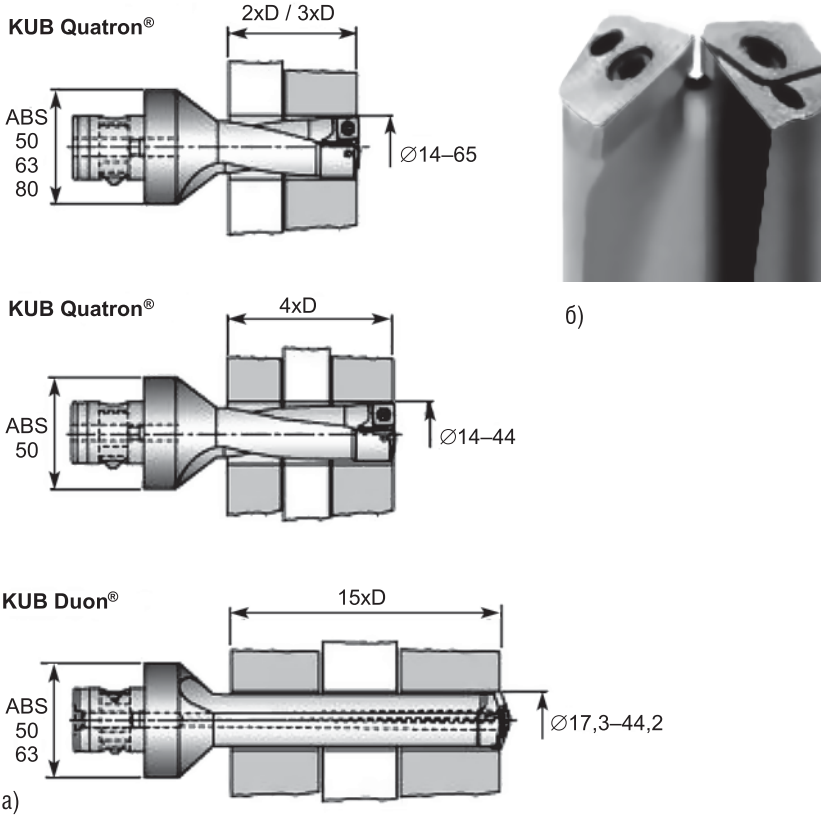



**Рис. 6.15.** Сверла со сменными пластинами KUB® компании KOMET GROUP, способные надежно обрабатывать пакеты листов: а – общий вид сверл; б – форма вершины сверла [147]

различных пластин – с различными геометрическими параметрами, из различных инструментальных материалов и т.п.

ССНП используются главным образом для отверстий глубиной менее трех диаметров отверстия. Подача обычно назначается в 2 раза меньше рекомендуемой для цельных спиральных сверл, поскольку пластины в процессе сверления срезают различную часть припуска. Однако за счет возможности применения в одной и той же конструкции пластин, имеющих специально подобранную для данного обрабатываемого материала геометрию, и более износостойких инструментальных материалов, в т.ч. с покрытиями, скорости резания при использовании ССНП могут быть значительно больше рекомендуемых для спиральных сверл.

Одним из существенных недостатков ССНП является низкая надежность центральной пластины, так как скорость резания на оси снижается до нуля и возникает большая вероятность поломки пластины из-за увеличенных осевых сил резания и затрудненного удаления стружки. Чтобы предотвратить такие поломки, центральную пластину «упрочняют» путем оптимизации геометрии и использования более прочного инструментального материала (см. рис. 6.11б).

ССНП без направляющей центральной части (рис. 6.11б), как правило, не применяют для сверления отверстий в пакетах, состоящих из различных обрабатываемых материалов. Это связано с формированием и отделением диска на выходе из обрабатываемого слоя и его прижатием к следующему слою, что приводит к невозможности измельчения (разрушения) этого диска и, в результате, к разрушению пластины. Из известных в настоящее время сверл, имеющих эту конструкцию, только сверла KUB® (рис. 6.15), благодаря специальному расположению режущих кромок, обеспечивают полное срезание материала обрабатываемого слоя непосредственно до зоны перехода к следующему слою [147].

### 6.3.1.3. Формы вершины (режущей части) спиральных сверл

Важной особенностью спиральных сверл является форма вершины, определяющая конфигурацию и характеристики режущих кромок сверла [175]. Конфигурация главных режущих кромок влияет на крутящий момент, осевую и радиальные силы (см. разд. 5), потребление энергии, температуру сверления, а также формирование заусенцев при врезании (на входе) сверла в заготовку и выходе из нее [101, 102]. Поперечная кромка (перемычка) определяет место положения сверла

(центрирование) до того, как начнут работать (резать) главные режущие кромки, а также направляет сверло в течение всего процесса резания. Она также влияет на осевую силу, существенно увеличивая ее. Ленточки, формирующие вспомогательные режущие кромки, влияют на шероховатость обработанной поверхности, а также вместе с перемычкой направляют сверло в отверстии и влияют на прямолинейность его оси и погрешность формы отверстия.

Чтобы снизить осевую силу и уменьшить расслаивание при сверлении ВПКМ, а также улучшить центрирование, повысить жесткость сверл и их стойкость, разработаны и применяются различные конфигураций вершин. Принимаемая форма вершины зависит от материалов сверла и обрабатываемой заготовки, глубины сверления, размера отверстия, требуемого качества отверстия и ожидаемой формы стружки. При проектировании формы вершины сверла принимают во внимание ориентацию поверхности отверстия относительно его оси на входе и выходе, возможность прерывания сплошности отверстия, формирование заусенца и желаемую стойкость инструмента, а также наличие или отсутствия кондукторной втулки в процессе сверления.

**Нормальная форма заточки**. Нормальная форма заточки (см. рис. 6.16а) является самой распространенной. Стандартным является угол при вершине быстрорежущего сверла $2\varphi = 118^\circ$, твердосплавного – $2\varphi = 140^\circ$. Стандартным сверлам свойственен их увод во время врезания, что часто требует либо выполнения центровочных отверстий, либо использования кондукторных втулок. Сверла с нормальной заточкой чаще всего используются в операциях, которые не требуют высокой точности и производительности. Для улучшения работы поперечной режущей кромки и лучшего центрирования часто выполняют подточку поперечной режущей кромки (табл. 6.5). Поперечная режущая кромка обычно выполняется с конической задней поверхностью или двухплоскостной и имеет большой отрицательный передний угол $\gamma$ (от $-50^\circ$ до $-60^\circ$).

**Радиальная подточка перемычки** предполагает V-образное утонение сердцевины в соответствии со стандартом DIN 1412 Form C (табл. 6.5). Существует три различных исполнения этой подточки. В общем случае остаточная длина поперечной кромки составляет 2–3% диаметра сверла. Шлифование осуществляется методом Hosoi. Так затачиваются сверла DIJET-HOSOI, SANDVIK DELTA, OSG EX-GOLD, MITSUBISHI NEW POINT, SUMITOMO MULTI POINT, TUNGALOY SPIRAL JET DSC, и GUHRING RT80, RT100, PRECISION TWIST DRILL и другие спиральные сверла [112].

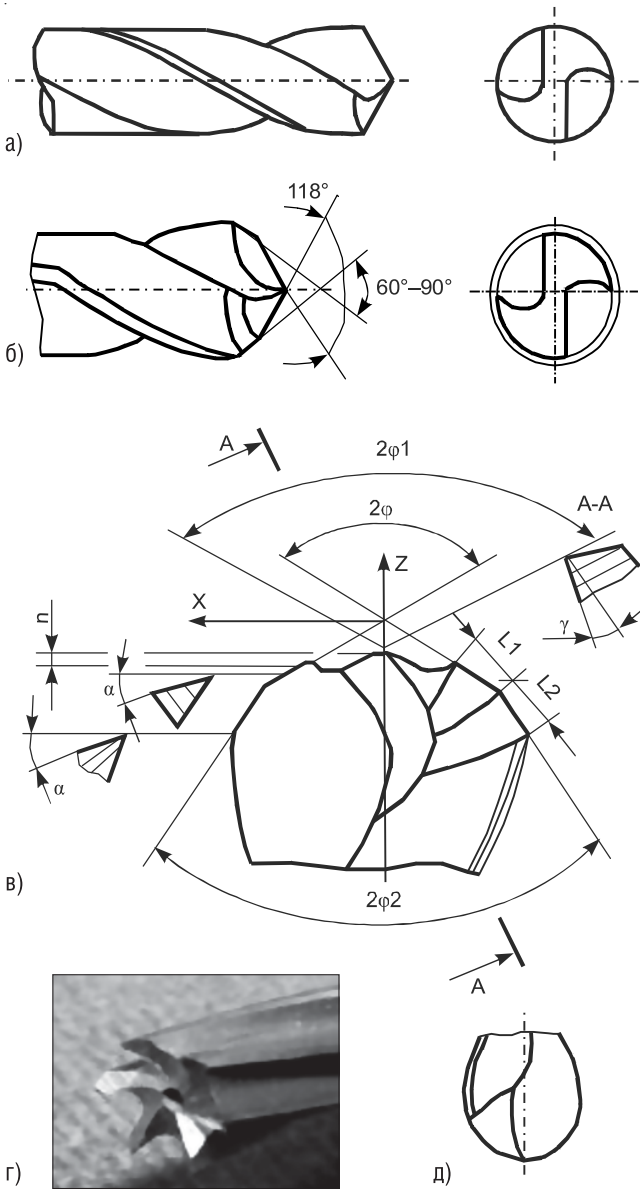
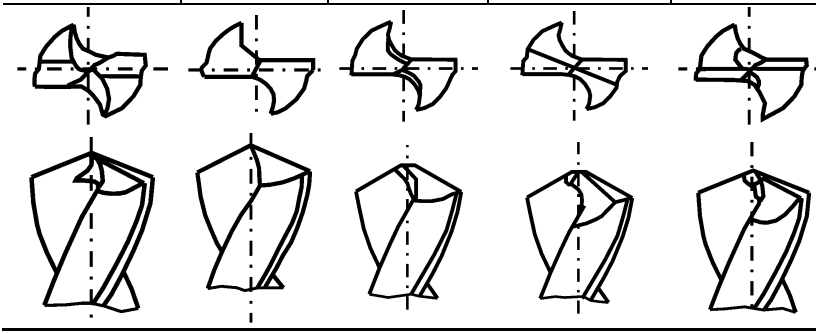



**Рис. 6.16.** Формы заточки вершины спиральных сверл, когда-либо применявшихся для сверления армированных композитов или смешанных пакетов из них [112, 149 и др.]

**Таблица 6.5.** Формы подточки перемычки [112, 148]

| Радиальная Split point Din 1412 Form C | Без подточки | Нормальная Din 1412 Form A | Двух-плоскостная | Усиленная подточка |
|---|---|---|---|---|
|  | | | | |

Радиальная подточка уменьшает износ вспомогательных режущих кромок и отказы сверла при сверлении твердых материалов, но способствует при сверлении мягких материалов выкрашиванию из-за наростообразования. Эта форма подточки предпочтительна для сверления титана, нержавеющей стали и жаропрочных сплавов, но может применяться и для обработки ВПКМ, поскольку способствует уменьшению осевой силы, а, следовательно, уменьшает вероятность расслаивания.

Сверла OSG EX-GOLD® отличаются тем, что в центральной части сверла нет поперечной кромки. Это обеспечивает лучшее центрирование и уменьшает осевую силу. В отличие от обыкновенных сверл стружка при сверлении этими сверлами ломается на мелкие части, что позволяет полностью отказаться от прерывистого сверления с периодическим выводом сверла из отверстия для удаления стружки из стружечных канавок.

**Двойная заточка** (*Double angle*) выполняется по стандарту DIN 1412 Form D (рис. 6.16б). Уменьшенный периферийный угол при вершине уменьшая износ и вероятность формирования заусенца на выходе, повышает точность отверстия. Кроме того, изменение направления режущей кромки также способствует изменению направления схода стружки на разных участках главной режущей кромки, в результате чего существенно улучшается процесс дробления стружки. Эта форма заточки эффективна при сверлении труднообрабатываемых материалов.

Развитием двойной заточки является тройная заточка вершины. У сверла с такой заточкой заборная часть имеет три пары режущих кромок: вначале короткие, образующие угол 55°, затем более длинные с углом 70° и, наконец, самые длинные с углом при вершине 118°. Прорезанная перемычка облегчает врезание сверла в обрабатываемый материал и при сверлении в 2,5–3 раза уменьшает осевую силу.

**Многоплоскостная заточка** (*multi-facet point-MFD*) [55, 112, 150]. Известны несколько вариантов практической реализации многоплоскостной заточки, отличающихся количеством плоскостей на главных задних поверхностях (рис. 6.16в). Шестиплоскостная заточка AVYAC напоминает четырехплоскостную заточку с дополнительной подточкой перемычки. С увеличением числа плоскостей заточка вершины сверла становится все более сложной.

Преимуществами сверл с многоплоскостной заточкой являются малые силы резания, улучшенный отвод теплоты, улучшенное удаление стружки, повышенное качество отверстия, высокие производительность обработки и стойкости инструмента.

**Сверла без поперечной режущей кромки.** Для уменьшения осевой силы вершина сверла может быть выполнена и без поперечной кромки. Этот тип вершины иногда называют обратной вершиной, поскольку угол при вершине около оси сверла обратный, т.е. больше 180° (рис. 6.16г). «Обратная» центральная часть разделяет режущие кромки на две части со встречными потоками формируемой стружки, что способствует интенсивному стружколоманию. Развитием этого типа заточки является **пилообразная заточка** (*Saw drill*) [54], которая обеспечивает периферийное распределение осевой силы для сверления отдельных слоев композиционного материала. Диаметр траектории вращательного движения режущей кромки в зоне, где имеет место такая заточка, а, следовательно, и зоны, где возможно расслаивание, при использовании этих сверл меньше диаметра сверла. Таким образом, поврежденные слои, если и образуются в процессе сверления, то они все равно удаляются при выходе сверла из этой зоны. Поэтому критическая сила с точки зрения образования расслаиваний для пилообразного сверла больше, чем для спирального сверла с нормальной заточкой, что позволяет выполнять обработку этими сверлами с большей подачей, чем при работе спиральными сверлами с нормальной заточкой.

**Радиусная и параболическая** формы заточек (рис. 6.16д), выполненные по DIN 1412 Form S, обеспечивают получение на станках с ЧПУ высокоточного отверстия в композиционных материалах без их расслоений. Сверла имеют криволинейную режущую кромку, зато-

ченную либо полностью по дуге окружности, либо частично с последующим сопряжением с прямолинейным участком режущей кромки. Радиус R дуги находится в пределах от 0,5 до 1,2 диаметра сверла. Полностью криволинейная режущая кромка позволяет уменьшить толщину среза на периферии сверла, где имеет место наибольшая скорость резания и увеличить ее в центральной зоне (у оси сверла), где скорость резания имеет минимальную величину. Благодаря этому уменьшается нагрузка на периферии сверла, т.е. в зоне наиболее интенсивного износа сверла и возможного расслаивания обрабатываемого материала. С другой стороны, криволинейная режущая кромка вызывает относительно большие деформации в стружке вследствие уменьшения текущего значения угла в плане φ и формирования в стружке «встречных» (пересекающихся) потоков, особенно при обработке пластичных материалов, что сопровождается снижением эффективности процесса стружколомания и ее удаления из зоны резания.

**Заточка вершины с острием** (*Brad-Point, C-shape, Candle stick, Spot weld Point*) [16, 80, 108]. Эта заточка выполняется по DIN 1412 Form E и имеет утонченную сердцевину в виде центрирующего острия и несколько вогнутые режущие кромки. Длина центрирующего острия обычно составляет 20–30% диаметра сверла. Вершина с острием разработана для сверления точных круглых отверстий в листовом металле с минимальным формированием заусенца. При работе таким сверлом в момент его выхода из обрабатываемого материала формируется диск, который практически не соединен с обрабатываемой деталью и легко удаляется из зоны резания движущимся сверлом. Эти сверла рекомендуются для сверления ВПКМ на основе арамидных волокон [4].

Специальные формы заточки режущей части сверла разработаны компаниями для решения главных проблем сверления ВПКМ и смешанных пакетов: уменьшение расслаивания, повышение точности отверстия и стойкости инструмента. Основные совершенствования режущей части сверла направлены на снижение осевой силы в момент формирования поверхности отверстия на выходе из контакта с заготовкой. Это достигается подточкой перемычки, т.е. уменьшением ее длины (рис. 6.17а), созданием чистовой и черновой режущих кромок (рис. 6.17б) или уменьшением угла в плане сверла до 90° (рис. 6.17в).

Геометрия инструмента, отличная от традиционной, может уменьшить вытягивание волокон на выходе вершины из формируемого отверстия за счет снижения осевой силы. Расслаивание на выходе можно уменьшить, если использовать сверло с острым углом при вершине.

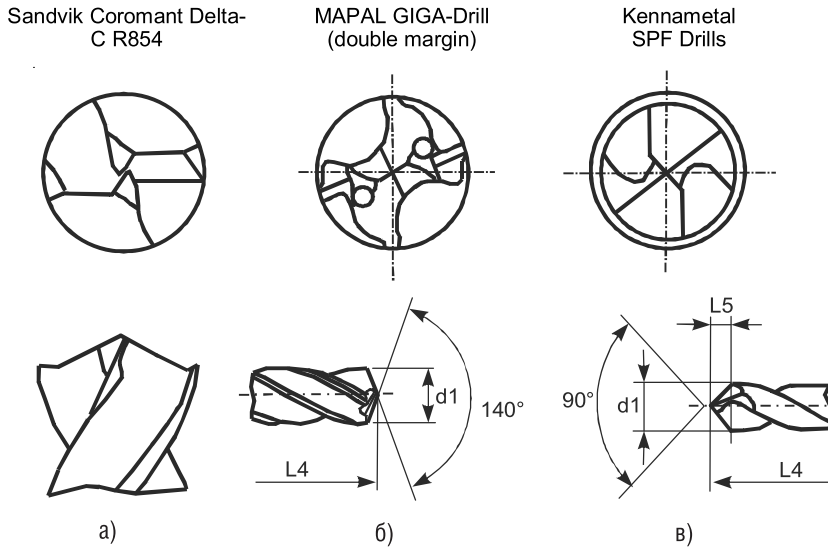



**Рис. 6.17.** Современные формы заточки сверл для ВПКМ [151, 152]

Фактически острая вершина (относительно малые углы в плане, например, рис. 6.17в) способствует прохождению сверла через последние слои на выходе с меньшей зоной контактного взаимодействия сверла со срезаемым слоем по сравнению с вершиной, имеющей большие углы в плане, например, рис. 6.17б. Среди геометрических параметров вершины сверла существенное влияние на величину осевой силы имеет не только угол при вершине (угол в плане), но и поперечная кромка: увеличение длины поперечной кромки приводит к увеличению осевой силы, которая оказывает определяющее влияние на разделение слоев при выходе за счет изгиба межламинарных соединений. Кроме того, резание в области поперечной кромки чрезвычайно затруднительно из-за наличия отрицательных передних и кинематических задних углов вблизи оси сверла и низких скоростей резания, что сопровождается, в принципе, переходом от процесса резания к процессу вдавливания. Сверла с радиальной подточкой перемычки (рис. 6.17) работают намного лучше, чем обыкновенные (рис. 6.16а), а многоплоскостные вершины сверл позволяют уменьшать осевую силу и благоприятнее распределять температуру в системе резания.

### 6.3.1.4. Влияние параметров сверла на показатели процесса сверления

Как уже отмечалось, на осевую силу и крутящий момент при сверлении спиральными сверлами влияют как угол при вершине сверла и длина поперечной кромки, так и диаметр сверла и толщина сердцевины, а также передний и задний углы [71, 153]. В данном разделе рассмотрены степени влияния указанных факторов на выходные показатели процесса сверлении ВПКМ спиральными сверлами, наиболее часто применяемыми при сборке летательных аппаратов. Общая схема влияния различных факторов на показатели процесса сверления представлена на рис. 6.18.

Увеличение **переднего угла** (***уменьшение угла заострения***) приводит к уменьшению крутящего момента. Известно, что передний и задний углы у спирального сверла изменяются вдоль режущей кромки за счет «винтовой» передней поверхности. Поэтому для уменьшения переднего угла и увеличения прочности кромки может использоваться корректировка главных режущих кромок путем создания с помощью дополнительного шлифования (заточки) плоской передней поверхности (см. рис. 6.16б), обеспечивающей постоянство переднего угла вдоль всей режущей кромки. Такую корректировку режущей кромки особенно рекомендуется использовать для неоднородных материалов, например, таких, как чугун, и в тех случаях, когда необходима небольшая по размерам прерывистая стружка для эффективного ее отвода из зоны резания. Положительные передние углы от 0° до 5°, полученные корректировкой режущей кромки, обеспечивают формирование прочной кромки для сверл общего назначения, предназначенных для сверления высокотвердых и высокопрочных, в т.ч. и хрупких, материалов, например, таких, как чугун, алюминиевые композиционные материалы с металлической матрицей, нержавеющие стали, легированные стали, титановые и жаропрочные сплавы.

Аналогичный эффект можно получить и при использовании сверл с прямой канавкой, например, перовых сверл (см. рис. 6.10а).

Малый или нулевой передние углы, как правило, могут приводить к ухудшению отвода стружки, а также, например, при сверлении мягких материалов, к интенсивному образованию нароста. Прочность лезвия с положительным передним углом может быть увеличена применением упрочняющей фаски размером от 0,025 до 0,1 мм [112]. Q. Zhang [154] показал, что модификация главных режущих кромок

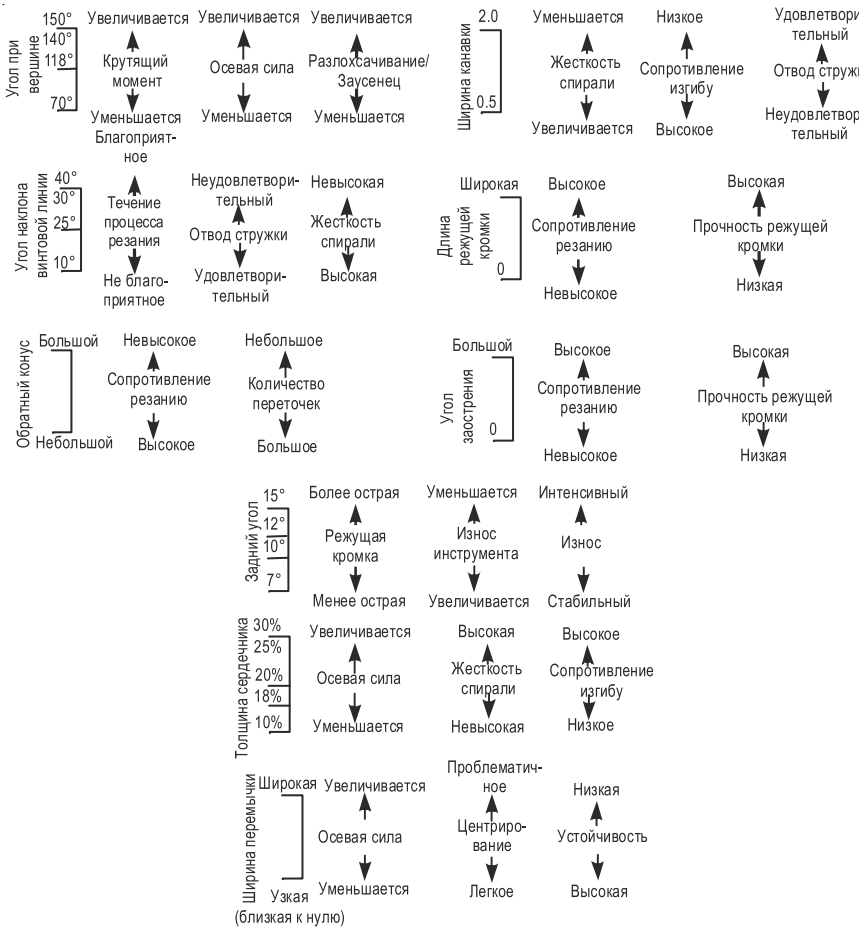


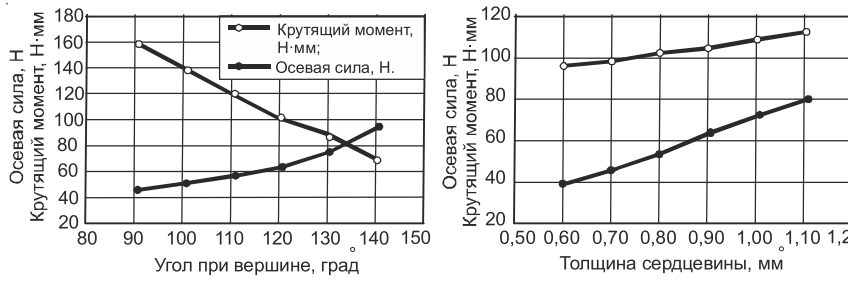

**Рис. 6.18.** Схема влияния различных факторов на показатели процесса сверления [66]

обеспечивает увеличение нормального переднего угла, а также разгрузку вершины в области поперечной кромки.

Увеличение **заднего угла** уменьшает стойкость инструмента из-за снижения прочности лезвий. Кроме того, опыт показывает, что увеличение номинального заднего угла при сверлении смешанных пакетов приводит к увеличению диаметра отверстия как в углепластике, так и в титановом сплаве.

**Поперечная кромка** (перемычка) формируется сердцевиной при затачивании сверл по задней поверхности. Отношение диаметра сердцевины к диаметру сверла является обычно достаточно большим. Толщина сердцевины обычно равна 15–20% диаметра сверла для больших сверл, но для сохранения жесткости может достигнуть и 50% диаметра, особенно для сверл малых диаметров. Выбор оптимальной толщины сердцевины сверла зависит прежде всего от прочности обрабатываемого материала.

В зоне контакта перемычки со срезаемым слоем, как правило, имеет место не резание, а пластическое выдавливание. Поэтому поперечная кромка способствует возникновению существенной осевой силы и крутящего момента, особенно при большой толщине сердцевины, что может быть связано как с увеличением длины поперечной кромки, так и с уменьшением переднего угла возле нее. Опыт показывает, что при традиционных подачах при сверлении ВПКМ поперечная кромка сверла с нормальной заточкой и толщиной сердцевины 20% диаметра сверла вносит в среднем 40–60% суммарной осевой силы (рис. 6.19). Если толщина сердцевины приближается к 30% диаметра сверла, влияние поперечной кромки на формирование величины осевой силы увеличивается в два раза, а в условиях, когда толщина сердцевины достигнет 40% диаметра сверла, влияние поперечной кромки на формирование величины осевой силы увеличится еще в 2 раза (или в 4 раза по сравнению с 20% сердцевиной сверла). Существует три подхода для уменьшения степени влияния поперечной кромки и улучшения процесса сверления:




а) б)

**Рис. 6.19.** Влияние угла при вершине сверла (а) и толщины сердцевины (б) на осевую силу и крутящий момент при сверлении однонаправленного углепластика. Диаметр сверла из быстрорежущей стали 5,0 мм, $n$ = 1370 об/мин, $s$ = 0,1 мм/об

1) уменьшение длины поперечной кромки путем ее подточки или изменения формы («расщепления») вершины сверла;
2) изменение формы поперечной кромки;
3) устранение поперечной кромки в целом.

Качество отверстия в значительной степени определяется не только размерами и геометрическими параметрами поперечной кромки, но и размерами (длиной) и геометрическими параметрами главных режущих кромок. Уменьшить вероятность расслаивания можно за счет увеличения длины главных режущих кромок путем уменьшения угла при вершине. Например, спиральные сверла со специальной геометрией, имеющие три кромки, передние углы, равные 0°, задние углы, равные 6°, и углы вспомогательных режущих кромок (ленточек), изменяющиеся от 59° до 0°, позволяют обеспечить высокое качество сверления тонких листов из углепластика даже без подкладной пластины [39].

Проведенные еще в 1978 году исследования показали [155], что при сверлении смешанных пакетов углепластик/Ti спиральными твердосплавными сверлами увеличение **угла при вершине** уменьшает крутящий момент и осевую силу, а также в титановом сплаве и шероховатость поверхности отверстия. Кроме того, увеличение угла при вершине уменьшает длину заусенцев (рис. 6.20) и стойкость инструмента, но увеличивает диаметр отверстия при прохождении его в титановом сплаве.

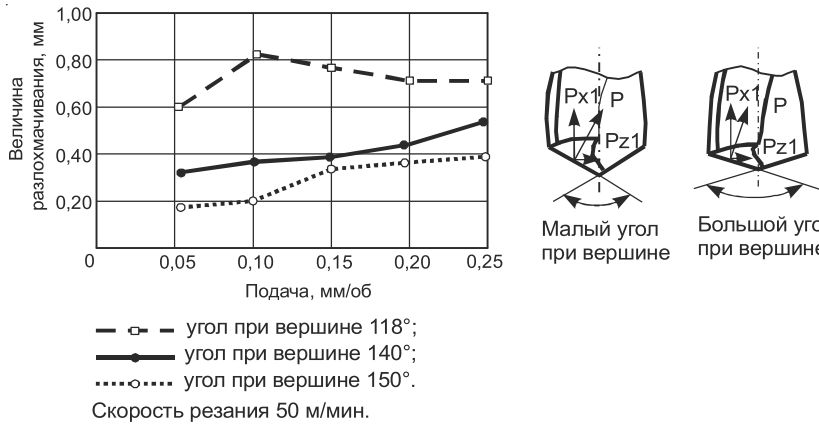



**Рис. 6.20.** Влияние угла при вершине сверла на проекции силы резания и величину заусенца [66]

Влияние **длины режущей кромки** на осевую силу и крутящий момент обратно пропорционально влиянию на них угла при вершине (см. рис. 6.18).

Сравнение эффективности различных сверл при сверлении титановых сплавов и ВПКМ представлено в работах V. Krishnaraj, F. B. R. Wong, R. Li, C. Tsao, H. Hocheng, L. M. Durao, а также в патентах WO 2008/013725 A2, WO 2007/015095 A1 и др.

Проведенные исследования [156] при сверлении титанового сплава ВТ6 со скоростями резания 50–70 м/мин показали, что наибольшую стойкость имеют твердосплавные сверла с двухплоскостной заточкой, а наименьшую шероховатость обеспечивают сверла с радиальной подточкой перемычки.

Исследования, представленные R. Li [157], также показали при сверлении титанового сплава ВТ6 преимущества твердосплавных сверл с радиальной подточкой поперечной кромки, обеспечивая их повышенную стойкость и на 25% меньшую осевую силу по сравнению со сверлами других конструкций. Твердосплавные спиральные сверла с радиальной подточкой поперечной кромки имеют преимущества, обеспечивая высокую стойкость, низкую осевую силу и крутящий момент, особенно при использовании СОЖ, которая подается по внутренним каналам, выполненным в сверле. Аналогичные результаты приведены и в работе [72]: сверла из быстрорежущей стали показали наибольший износ, а твердосплавные сверла – наименьший после одинакового, относительно небольшого количества отверстий, просверленных в смешанном пакете Gr/Bi-Ti.

В работе [27] были исследованы и сравнены по силам резания, износу инструмента, качеству отверстия, а также образованию и отводу стружки, различные конструкции твердосплавных сверл с улучшенной конфигурацией и покрытиями. В обзоре отдельных исследований V. Krishnaraj et al. [108, 158, 159] сравнили спиральные цельные твердосплавные сверла с с нормальной заточкой и многоплоскостной заточкой при сверлении стеклопластика. Они установили, что сверло с многоплоскостной заточкой обеспечивает меньшую осевую силу и лучшее качество поверхности при большей подаче, чем спиральное сверло с нормальной заточкой. Сверло с многоплоскостной, в частности с четырех плоскостной, заточкой обеспечивает наименьшие расслаивание и наилучшее качество поверхности по сравнению с другими сверлами.

Из результатов своих исследований C. C. Tsao [160] сделал вывод, что из всех факторов наибольшее влияние на осевую силу оказывают

подача и конструкция сверла. Влияние на этот параметр частоты вращения шпинделя сравнительно меньше.

В порядке уменьшения осевой силы сверла по форме заточки их вершины можно расположить следующим образом: спиральное сверло с нормальной заточкой, спиральное сверло с пилообразной заточкой, трубчатое сверло, сверло с острием. Применение спиральных сверл с нормальной заточкой при сверлении ВПКМ неизбежно приводит к расслаиванию на выходе [161]. В работах [153, 162] показано, что при сверлении ВПКМ твердосплавными сверлами в виде «трехгранной пирамиды» обеспечивает на 60% меньшую осевую силу, чем обычное спиральное сверло, но в 1,5–2 раза больший крутящий момент.

Критическая осевая сила также зависит от конструкции сверла. Ступенчатые и спиральные сверла с нормальной заточкой обеспечивают относительно небольшую критическую силу, в то время как трубчатое сверло обеспечивает самое высокое значение этой силы. Вместе с тем следует отметить, что трубчатое сверло способно обеспечить самую большую подачу при сверлении без расслаивания [71].

D. Iliescu [89] сравнил ряд сверл с различной конструкцией и формами режущей части и пришел к выводу, что практически ни одно из рассмотренных сверл для сверления углепластика T300/914 не является оптимальным. Наилучшие качество и стойкость из имеющихся на рынке сверл показало сверло с алмазным покрытием DIAGER 22690, которое увеличивает ресурс инструмента в 5–6 раз. Однако оптимальное сверло из твердого сплава, по его мнению, должно иметь алмазное покрытие, угол спирали 40°, двойную заточку вершины с углами 125–130° и 90° и главный задний угол 11°.

### 6.3.1.5. Режимы резания и сравнение эффективности различных сверл

На рис. 6.21 показаны общие тенденции изменения и взаимосвязи режимов резания и показателей процесса сверления. Увеличение подачи может вызвать расслаивание и разлохмачивание, в то время как увеличение скорости уменьшает осевую силу и крутящий момент при резании, одновременно понижая стойкость инструмента [115]. По мнению E. U. Enemuoh и авторов [38], скорость резания является наиболее значимым фактором с долей 45% суммы всех факторов, оказывающих влияние на шероховатость поверхности. В отличие от механической обработки металлов при формировании отверстий в ВПКМ подача оказывает незначительное влияние на шероховатость обработанной поверхности.

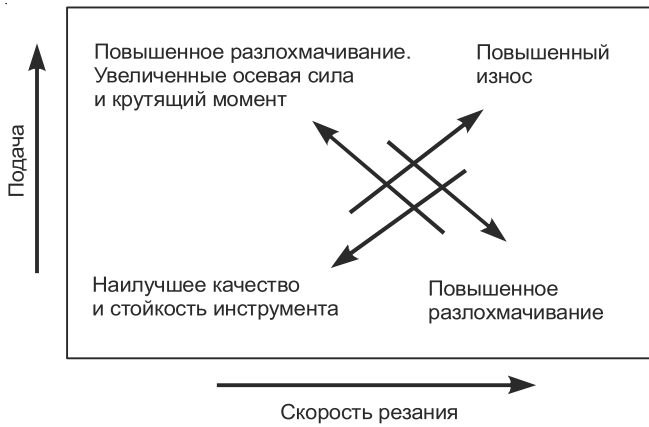



**Рис. 6.21.** Принципиальная схема влияния режима резания на показатели процесса сверления углепластиков [115]

При сверлении ВПКМ для обеспечения низкой шероховатости и высокого качества обработанной поверхности (без расслаивания, особенно в нижних слоях пластины) подача должна быть настолько низкой, насколько это возможно при реализации конкретной технологической операции (как правило, от 0,025 мм/об до 0,1 мм/об). Использование станков с ЧПУ, обеспечивающих переменную подачу, – один из лучших вариантов реализации такой технологической операции, дающий возможность уменьшить подачу при достижении сверлом нижних слоев пластины и увеличить подачу в верхних слоях [12].

Скорости резания могут измениться в пределах от 25 м/мин – для сверл из быстрорежущей стали до 150 м/мин – для сверл с режущей частью из ПКА [12].

M. S. Won and C. K. Dharan [163] установили, что для обеспечения высокого качества обработанной поверхности при сверлении углепластиков сверлом диаметром 6,35 мм максимальная подача должна составлять 0,145 мм/об, а при сверлении ВПКМ, армированных арамидом, – 0,045 мм/об. E. U. Enemuoh et al. [164] определили оптимальные режимы резания углепластиков для твердосплавного спирального сверла с углом при вершине 118°: скорость резания в пределах от 45 до 51 м/мин, подача 0,022 мм/об. По его рекомендациям для сверления твердосплавными сверлами углепластиков с минимальным

расслаиванием и высоким качеством поверхности отверстия необходимо применение низких подач в пределах от 0,02 до 0,05 мм/об и скоростей резания в пределах от 40 до 60 м/мин [12].

Увеличение скорости резания приводит к интенсификации изнашивания инструмента и, соответственно, к снижению его ресурса, увеличивает распушивание и размеры заусенца на входе и выходе отверстия, а также увеличивает глубину повреждений.

Увеличение подачи приводит к росту осевой силы и крутящего момента, способствует увеличению распушивания и образованию заусенцев, повышает глубину повреждений в обработанной поверхности, увеличивает шероховатости поверхностей во всех слоях независимо от материалов, из которых состоит пакет. Вместе с тем увеличение подачи позволяет повысить ресурс инструмента [72].

Исследователи M. Ramulu, T. Branson, D. Kim [43, 72 и др.] рекомендуют при сверлении пакетов ВПКМ/Ti использовать твердосплавные сверла. Так, при сверлении сверлами Ш6,35 мм рекомендуется производить обработку с частотой вращения 660 об/мин и подачей 0,08 мм/об. С учетом качества отверстия и производственных затрат режим должен быть скорректирован: для твердосплавных сверл – подача 0,140 мм/об и частота вращения шпинделя 660 об/мин. Для сверл из быстрорежущей стали оптимальными оказались подача 0,189 мм/об и частота вращения шпинделя 990 об/мин, хотя расход этих сверл значительно больше.

### 6.3.2. Инструменты для чистовой обработки отверстий

Для чистовой обработки отверстий в однородных и смешанных пакетах, в том числе и содержащих ВПКМ, применяются развертки и протяжки.

***Развертки*** – это одно- или многозубые режущие инструменты, работающие с главным вращательным движением резания и используемые для увеличения диаметра отверстия и улучшения его качества, обеспечения точности отверстия до 6–9 квалитета. Конструкции разверток и применяемые технологии процесса развертывания при обработке однородных и смешанных пакетов, содержащих ВПКМ, практически ничем, за исключением режимов резания и в некоторых случаях значений геометрических параметров режущей части, не отличаются от тех, которые успешно применяются при обработке традиционных конструкционных материалов.

Основные геометрические параметры режущих кромок разверток определяется таким же образом, как и для сверлильных, расточных и фрезеровальных инструментов. К основным параметрам геометрии относятся угол заборного конуса, осевые и радиальные передние углы, главные и вспомогательные задние углы, угол и направление наклона винтовой линии, а также конструкция ленточки.

Работа развертки подобна работе сверл без поперечной кромки, в особенности трубчатых сверл, а также работе расточных резцов. Развертка традиционно закрепляется в радиально-плавающем патроне (держателе), который позволяет ей самоустанавливаться в уже существующем отверстии: она следует за средней линией развертываемого отверстия и не корректирует среднюю линию отверстия относительно средней линии шпинделя станка. Вместе с тем иногда применяются и жесткие схемы установки развертки по аналогии с расточными резцами, которые всегда закрепляются жестко с целью корректировки именно средней линии увеличиваемого отверстия. Следующим существенным различием указанных процессов является то, что развертка обычно работает при более низких скоростях резания и более высоких подачах, чем расточной инструмент, это связано с наличием у развертки большего количества лезвий и меньшей скоростью резания. Развертки, закрепленные в плавающем патроне, применяются, как правило, для повышения качества обработанной поверхности, например, точности формы отверстия. И, наконец, развертка в отличие от расточного резца может успешно использоваться для развертывания с помощью ручных машин.

Качество развернутых отверстий зависит от точности предварительно обработанного отверстия, геометрии развертки, способа закрепления развертки и жесткости самой развертки, а также станочной системы (станка и приспособлений), режима резания, наличия и свойств применяемой СОЖ и некоторых других факторов. Развертки, как правило, позволяют обработать отверстия с величиной и вариацией овальности меньше 25 мкм.

Большинство разверток выпускаются цельными (как правило, из инструментальных легированных и быстрорежущих сталей, твердых сплавов), а также сборными с режущими элементами из быстрорежущих сталей или с напайными пластинами из твердого сплава. Изготавливаются также развертки и со сменными пластинами или головками, что позволяет существенно уменьшить себестоимость процесса обработки такими инструментами за счет исключения повторной заточки и, соответственно, времени на восстановление работоспособности развертки после ее затупления.

Рабочие части разверток для обработки ВПКМ рекомендуется оснащать пластинами из твердого сплава, например, марок ВК3М и ВК2 или ПКА. Допускается применение сплава марки ВК8. Рекомендуются следующие геометрические параметры рабочей части разверток: передний угол $\gamma = 0°$; задний угол $\alpha = 8–10°$; угол при вершине $2\varphi = 15°$[16].

На рис. 6.22 приведены конструкции многоступенчатых разверток с режущими элементами из ПКА для коротких и длинных отверстий.

Такие развертки являются самоустанавливающимися и в процессе резания следуют за своими собственными средними линиями. Они мало исправляют погрешности прямолинейности и позиционное отклонение. Режущая кромка, направляющая и периферийная пластины определяют диаметр обработанного отверстия и также могут уменьшать отклонение от круглости.

Однозубая развертка может использоваться как в режиме развертывания, когда она установлена в плавающем патроне, так и в режиме

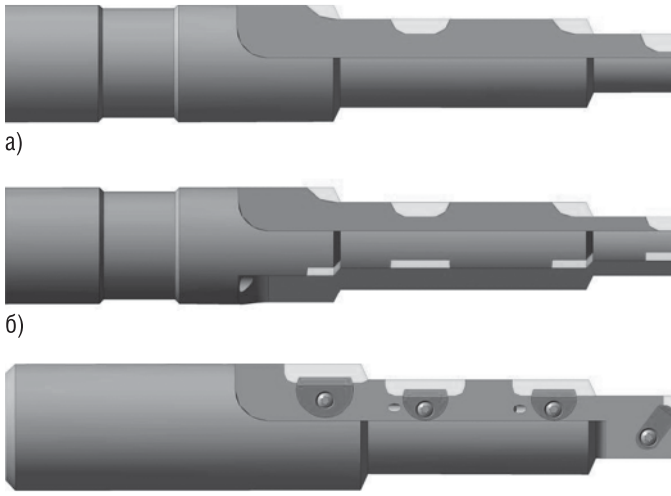



**Рис. 6.22.** Конструкции разверток с режущими элементами из ПКА для коротких и длинных отверстий:
а – многоступенчатая развертка с пластиной из поликристалического алмаза;
б – многоступенчатая развертка с несколькими канавками; в – многоступенчатая развертка с пластинами из поликристаллического алмаза

растачивания, когда она закреплена в жестком патроне или если используется кондукторная втулка, позволяющая управлять направленностью результирующего движения резания, особенно на входе в уже имеющееся отверстие.

Многозубые развертки имеют большую производительность и стойкость, чем однозубые развертки, но обычно формируют отверстия с несколько большими отклонениями от круглости [112]. Многозубые развертки обычно работают с большими подачами, чем сверла, из-за большего количества зубьев. В некоторых случаях с целью либо предотвращения, либо снижения вибраций зубья развертки выполняются с неравномерным шагом. Увеличение числа зубьев на развертке способствует формированию на поверхности отверстия большего количества впадин или выступов, что, в свою очередь, уменьшает отклонение от круглости обработанного отверстия.

С помощью разверток получают точные отверстия только в том случае, если они вращаются со шпинделем без радиального биения и ось развертки параллельна оси формируемого отверстия, что легче всего можно достичь с помощью патронов, регулируемых в осевом и радиальном направлении.

Для чистовой обработки отверстий 7–9 квалитетов точности в однородных пакетах из алюминиевых, титановых сплавов и сталей, а также в смешанных пакетах из этих материалов часто применяются протяжки.

В зависимости от толщины пакетов, диаметров отверстий и материалов деталей в пакете могут применяться как режущие, так и деформирующие протяжки. Иногда возможно совмещение режущих и деформирующих проходов в комбинированных протяжках.

Следует отметить, что в связи с большой вероятностью повреждения отверстия на выходе из листа из-за больших осевых сил применение протягивания в листах из ВПКМ весьма ограничено. Вместе с тем применение протягивания вполне возможно в смешанных пакетах, когда листы ВПКМ расположены между металлическими листами.

### 6.3.3. Инструмент для снятия заусенцев и обработки фасок

Для снятия заусенцев и обработки фасок в отверстиях деталей из ВПКМ обычно используются зенковки, которые изготавливаются цельными из твердого сплава или сборными со стальным корпусом и напаянными или сменными твердосплавными пластинами.

Применение сменных пластин делает возможным использование в качестве инструментального материала для этих инструментов поликристаллического алмаза или кубического нитрида бора. Зенковки могут изготавливаться с направляющими элементами, необходимыми для точного центрирования режущего инструмента в отверстии. Для регулирования глубины обработки используют специальные ограничители [4, 11].

Существует несколько типов инструментов для снятия заусенцев. Эта операция может выполняться либо отдельным инструментом (рис. 6.23), либо комбинированным инструментом одновременно со сверлением и/или развертыванием (рис. 6.24).

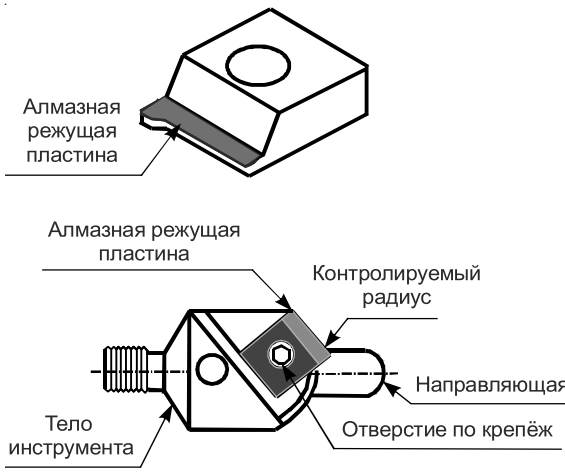



**Рис. 6.23.** Конструкции зенковок для обработки мест под заклепки [4]

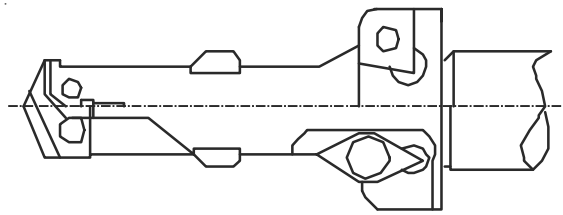


**Рис. 6.24.** Комбинированный инструмент с режущими кромками для снятия фасок и заусенцев

**Рис. 6.25**. Фреза линии Мультимастер со сменной головкой MM HDF компании ISCAR

Для зенкования гнезд под потайные головки заклепок и болтов и фрезерования фасок наружных и внутренних поверхностей следует отметить решение компании ISCAR. Сменная головка MM HDF для фрез линии Мультимастер (рис. 6.25) изготавливается из ультрамелкозернистого твердого сплава с алмазным покрытием, а режущая геометрия данной сменной головки ориентирована на обработку достаточно широкого спектра различных ВПКМ.

Обработка мест под головки винтов, фасок и скруглений с тыльной стороны отверстия представляет большую сложность, если доступ к отверстию ограничен. Выполнение обработки в этом случае возможно с помощью специальной зенковки, режущая часть которой «прячется» в державку при включении обратного вращения шпинделя [114]. Примером такой зенковки является SOLO 1000 (рис. 6.26). В нем использованы два центробежных толкателя для управления положением режущего лезвия. При частоте вращения шпинделя 1000 об/мин, обеспечивающей требуемую скорость активации, толкатели начинают перемещаться наружу и поворачивают зубчатое колесо. Зубчатое колесо выводит режущее лезвие, которое выполняет требуемую

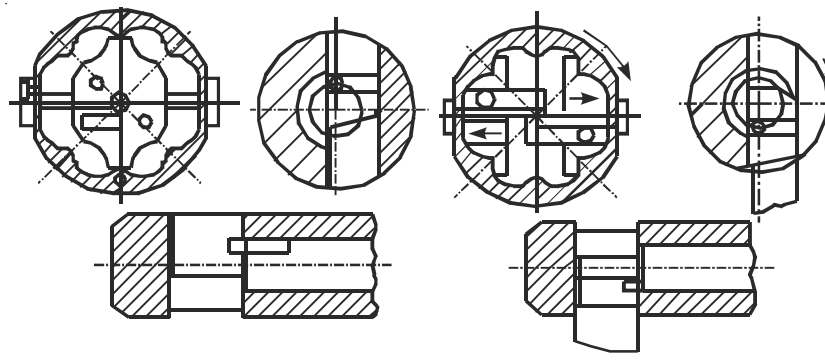


**Рис. 6.26**. Принцип работы зенкера SOLO 1000 [114]

технологическую операцию. Когда шпиндель останавливается, возвратная пружина прижимает центробежные толкатели в направлении к центру и отводит лезвие назад от зоны обработки.

Для зенкования гнезд под головки заклепок и болтов с углом конуса 120° применяют четырех- или шестизубые зенковки. Угол при вершине зенковки должен быть равным углу конуса потайной головки заклепки или болта, т.е. $2\varphi = 120°$, задний угол $\alpha = 15–20°$, а передний угол $\gamma = 0–10°$. Зенкование гнезд под головки потайных заклепок и болтов с углом конуса 90° осуществляют шестизубыми зенковками с углами: $2\varphi = 90°$, $\alpha = 15–20°$, $\gamma = 0–10°$. При увеличении количества зубьев у зенковок повышаются качество поверхности обрабатываемых гнезд и стойкость инструмента. Режущие кромки зенковок должны быть остро заточены. Об износе зенковок свидетельствует появление ворсинок и граненой поверхности по периметру лунок. Допустимый износ по задней поверхности составляет $h_з = 0{,}1$ мм [16].

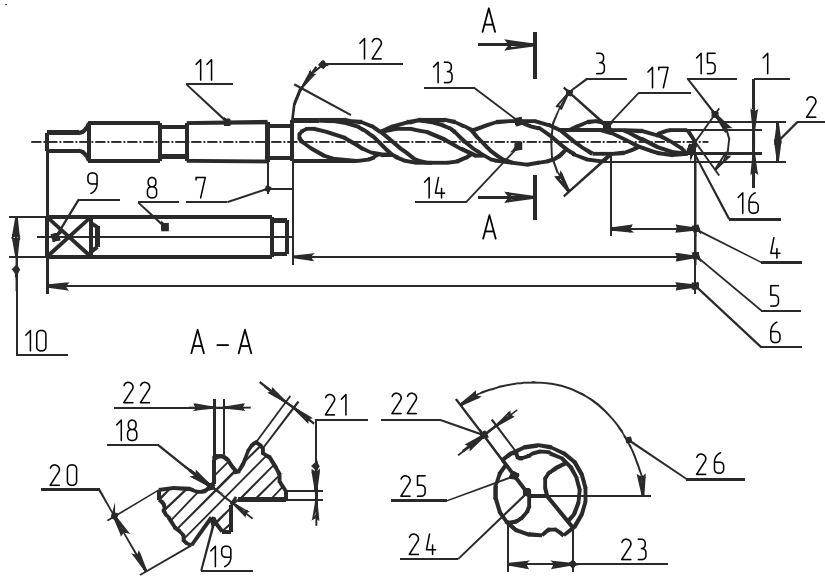
### 6.3.4. Комбинированный осевой инструмент

В аэрокосмической и авиационной промышленности широко распространены комбинированные осевые (многоступенчатые) инструменты, совмещающие в себе в различных комбинациях сверло, зенкер, развертку, зенковку.

Современные многоступенчатые инструменты могут быть выполнены в двух исполнениях ступеней – с совмещенными (*step*) и разделенными (*subland*) зубьями и стружечными канавками [112].

Во многоступенчатом инструменте с совмещенными канавками все зубья каждой ступени имеют одни и те же канавки и ленточки. У многоступенчатого инструмента с разделенными канавками у зубьев каждой ступени есть своя собственная канавка, например, как у двухступенчатого сверла, показанного на рис. 6.27. Это хоть и приводит к усложнению конфигурации канавки и, соответственно, конструкции инструмента, но обеспечивает эффективное разделение двух или более инструментов, имеющих общую ось и сердцевину. Выбор исполнения зависит от количества зубьев для каждой ступени. Инструменты с разделенными зубьями ступеней имеют, как правило, меньшее число зубьев, чем инструменты с совмещенными канавками и зубьями, потому что у последних стружечные канавки всех ступеней совпадают.

Преимущество многоступенчатых инструментов с разделенными канавками над инструментами с совмещенными канавками состоит в

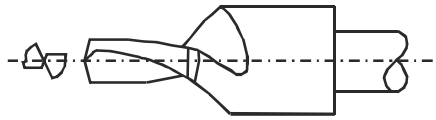



| | | | |
|---|---|---|---|
| 1 | Диаметр первой ступени сверла | 14 | Стружечная канавка |
| 2 | Диаметр второй ступени сверла | 15 | Угол при вершине первой ступени сверла |
| 3 | Угол при вершине второй ступени сверла | 16 | Режущие кромки первой ступени сверла |
| 4 | Шаг первой ступени | 17 | Режущие кромки второй ступени сверла |
| 5 | Рабочая часть | 18 | Сердечник |
| 6 | Общая длина | 19 | Сердечник |
| 7 | Шейка | 20 | Спинка режущей часть второй ступени сверла |
| 8 | Цилиндрический хвостовик | 21 | Ленточка второй ступени сверла |
| 9 | Поводок | 22 | Ленточка первой ступени сверла |
| 10 | Диаметр цилиндрического хвостовика | 23 | Спинка первой ступени |
| 11 | Конусный хвостовик | 24 | Перемычка |
| 12 | Угол наклона винтовой линии | 25 | Задняя поверхность |
| 13 | Вспомогательная режущая кромка второй ступени сверла | 26 | Угол поперечной режущей кромки |

**Рис. 6.27.** Конструкция двухступенчатых сверл с разделенными зубьями

**Cutter M — только сверло**
Стандартная перемычка

**Cutter P — Сверло + Развёртка**
Сочетание сверло/развёртка позволяет получать точные отверстия с одного прохода.
Стандартная перемычка

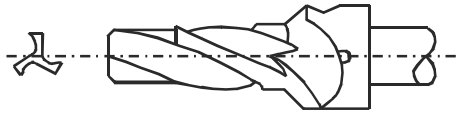


**Cutter R – Сверло + Зенковка;**
Сочетание сверло/зенковка позволяет получать точные отверстия и сформировать фаску с одного прохода.
Стандартная перемычка.

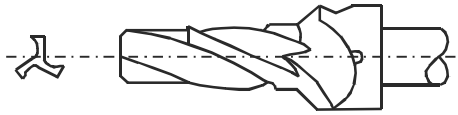
**Cutter T – Сверло + Развёртка + Зенковка**
Сочетание сверло/развёртка/ позволяет получать точные отверстия и сформировать фаску с одного прохода.
Стандартная перемычка.

**Cutter N – Развёртка**
Левосторонняя спираль, с возможностью удаления стружки в процессе обработки без повреждения поверхности и размера отверстия

**Cutter Q – Оружейное сверло**
Жесткое сверло с каналами для подачи смазывающей жидкости. Применяется с прямой подачей для обработки глубоких отверстий и получения высокого качества поверхности. Возможно зенкерование.



**Cutter U – Развёртка + Зенковка**



**Cutter V – Коническая развёртка + Зенковка**

**Рис. 6.28.** Стандартные исполнения комбинированных инструментов для аэрокосмической промышленности [165]

возможности сохранения геометрии для всех ступеней после переточки, и поэтому возможно большее количество переточек.

Многоступенчатый инструмент обычно используются для обработки отверстия за один проход. Это может быть ступенчатое отверстие с фасками или местами под головку болта, а также отверстие с повышенными требованиями к позиционному отклонению или разными требованиями к точности и шероховатости поверхности на формируемых ступенях (рис. 6.28).

При изготовлении отверстий в КМ комбинированный инструмент применяется также и для решения проблемы возможного расслаивания. В настоящее время находят применение такие конструкции комбинированных инструментов, как ступенчатые сверла и сверла/развертки, а также сочетания сверло/трубчатое сверло (рис. 6.29).

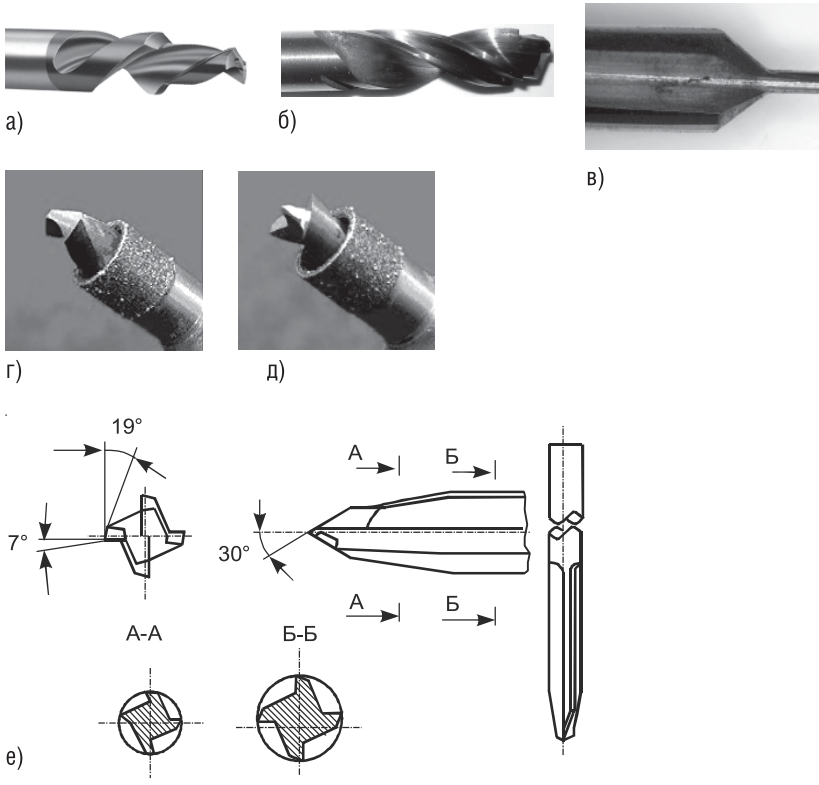



**Рис. 6.29.** Конструкции комбинированных сверл

Основной целью таких конструкций является уменьшение изгибающих нагрузок на нижележащие (впереди идущие) волокна ВПКМ, что особенно важно при чистовой обработке отверстия. Наиболее широкое применение находят перовые сверла/развертки с двумя-четырьмя зубьями и острым углом при вершине, обеспечивающим возможность получения качественного отверстия с использованием ручного механизированного инструмента [107, 166].

На рис. 6.29а показано двухступенчатое спиральное сверло с совмещенными канавками (*step drill*) [12, 54]. Первое сверло формирует направляющее отверстие, второе выполняет чистовую обработку отверстия.

Сверло-развертка (рис. 6.29б) с разделенными канавками (*Jodrill, drill-reamer*) [38] совмещает в себе спиральное сверло и развертку. Первая ступень короткая и имеет диаметр, составляющей около 80% диаметра отверстия. Вторая ступень необходима для повышения качества обработанной поверхности.

Специальное ступенчатое сверло (*special step drill*) [12, 41] (рис. 6.23в) имеет два диаметра сверления, например, 1,25 и 6 мм, и разделяет сверление, а следовательно, осевую силу, на две стадии: первое сверло формирует предварительное отверстие, второе – окончательное. При обработке таким инструментом для получения отверстия более высокого по точности и шероховатости качества необходима дополнительная технологическая операция – зенкерование или развертывание.

Tsao C. [143] показал возможность решения проблемы стружкоотвода при использовании кольцевых сверл за счет их совмещения со стержневыми сверлами. Лучший результат был получен в комбинации спирального сверла с кольцевым сверлом (рис. 6.29г, д) [167].

В процессе сверления сверлом-разверткой Tapered «One-Shot» Drill Reamer [107, 166] большая часть нагрузок действуют не в осевом, а в радиальном направлении, что устраняет расслаивание. Этот инструмент имеет три ступени (рис. 6.29е): сверло с острым углом при вершине (1), развертка (2) и направляющая (3). Все три части необходимы для того, чтобы получить требуемые чистоту и точность отверстия. Такими сверлами можно обеспечить допуск отверстия ±0,05 мм.

Находят применение комбинированные сборные инструменты, позволяющие за один прием выполнять обработку отверстия и фаски. Сверление и зенкование с помощью комбинированного инструмента обеспечивают лучшее качество отверстия [108]. Характерная номенклатура таких инструментов показана на рис. 6.30.

**Рис. 6.30.** Примеры конструкций комбинированных сборных инструментов [145]

а) б)

**Рис. 6.31.** Насадные зенкеры Ferro-Tic ® и их применение [168]

Для обработки фасок и гнезд под головки винтов находят применение насадные зенковки (рис. 6.31а), закрепляемые на сверлах (рис. 6.31б). Твердосплавные зенковки предназначены для резания абразивных композиционных материалов, таких, как стекловолокно, ДСП и др.

## Выводы

На основании сказанного можно сделать такие выводы:

1. Инструментальные материалы для обработки однородных и смешанных пакетов, содержащих ВПКМ, должны обеспечивать высокое сопротивление абразивному износу рабочих поверхностей, иметь низкий коэффициент трения, высокие теплопроводность и теплостойкость.

2. В настоящее время для обработки ВПКМ все чаще вместо быстрорежущих инструментов применяются твердосплавные инструменты. Это объясняется значительно более высокой стойкостью твердого сплава по сравнению с быстрорежущей сталью к абразивному износу. Наиболее часто применяется мелкозернистые и особо мелкозернистые твердые сплавы. Дополнительное повышение режущей способности инструментов при обработке ВПКМ можно достигнуть за счет нанесения на рабочие поверхности твердосплавных инструментов покрытий. За счет высокой твердости и теплопроводности наибольший эффект показали ультрадисперсные алмазные покрытия.
3. Для формирования отверстий в однородных и смешанных пакетах, содержащих ВПКМ, необходимо применение осевого инструмента специальной конструкции, обеспечивающей уменьшение осевой силы и смещение места ее приложения ближе к периферии отверстия. Это достигается модификацией форм заточки спиральных сверл, применением кольцевых сверл, а также комбинированного инструмента. Уменьшение угла при вершине и многоплоскостная заточка позволяют улучшить качество и увеличить производительность обработки отверстий в ВПКМ.
4. Для чистовой обработки отверстий 7–9 квалитетов точности в однородных и смешанных пакетах, содержащих ВПКМ, возможно применение разверток, протяжек и комбинированных инструментов. Протяжки имеют ограниченное применение, поскольку они вызывают большую осевую силу и расслоения на выходе из отверстия. В последние годы широкое развитие получили комбинированные многоступенчатые инструменты с разделенными канавками, обеспечивающие как возможность сохранения геометрических параметров ступеней при переточках, так и достаточно большое количество переточек.
8. Для удаления заусенцев и обработки фасок в отверстиях деталей из ВПКМ используются цельные и сборные зенковки с направляющими элементами и без них. Применение механизированных зенковок позволяет обрабатывать отверстия даже в тех случаях, когда доступ с тыльной стороны ограничен.

РАЗДЕЛ 7

# Технологические методы обеспечения качества отверстия

Для повышения качества отверстий в однородных и смешанных пакетах, содержащих ВПКМ, кроме выбора инструмента и режимов резания, могут быть использованы дополнительные технологические приемы, введена в зону резания дополнительная энергия, применены нетрадиционные кинематические схемы резания и процессы обработки отверстий (табл. 7.1).

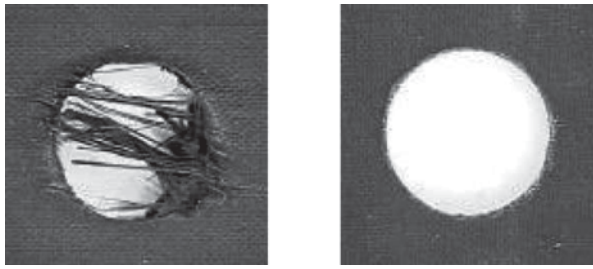
**Таблица 7.1.** Пути совершенствования технологии обработки отверстий в пакетах, содержащих ВПКМ

| | |
|---|---|
| 1. Оптимизация инструментального материала, конструкции инструмента и геометрических параметров его режущей части | |
| 2. Дополнительные технологические приемы при сверлении | Опорная (подкладная) пластина |
| | Система подачи СОЖ и резание без применения СОЖ |
| | Сверление направляющего отверстия |
| 3. Нетрадиционные кинематических схемы резания | Сверление с вибрациями |
| | Спиральное фрезерование |
| | Сверление с адаптивно управляемой подачей |
| | Сверление с прерывистой подачей |
| 4. Нетрадиционные процессы обработки | Резание лазером |
| | Гидроабразивное резание |
| | Ультразвуковое резание |
| | Электрическое резание |

## 7.1. Применение опорной пластины

Одним из технологических приемов является применение опорной (подкладной) пластины для поддержания слоя ВПКМ со стороны выхода сверла, который способствует предотвращению расслаивания практически для всех видов сверл [50].

Применение опорной пластины (рис. 7.1) увеличивает критическую силу $[P_x]$, практически не изменяя фактическую силу резания $P_x$ [70].



а) б)

**Рис. 7.1.** Эффект от применения опорной пластины при сверлении углепластика сверлом с пилообразной заточкой [70]: а – сверление отверстия без подкладной пластины; б – сверление отверстия с подкладной пластиной

Следует отметить, что в том случае, когда применение опорной пластины невозможно, склонность ВПКМ к расслаиванию на выходе сверла можно понизить путем нанесения на обратную сторону листа ВПКМ клея, который, в принципе, «заменяет» после своего отверждения опорную пластину.

## 7.2. Применение направляющего отверстия

Известно, что при сверлении на поперечную режущую кромку приходится 40–60% всей осевой силы [32, 172], что в момент ее выхода из контакта с обрабатываемым ВПКМ приводит к его интенсивному расслаиванию, вследствие того что поперечная режущая кромка в большей степени реализует процесс выдавливания, чем резания. Одним из эффективных технологических приемов, позволяющих уменьшить осевую силу и расслаивание при сверлении ВПКМ, является предва-

рительное выполнение направляющего отверстия [173], которое может быть выполнено как на отдельном переходе сверлом меньшего диаметра, так и на основном переходе с помощью ступенчатого сверла [32, 33, 50, 162, 172]. Диаметр направляющего отверстия должен быть большим, чем длина поперечной режущей кромки основного сверла. Следует обратить внимание на то обстоятельство, что, с одной стороны, меньший, чем длина поперечной режущей кромки основного сверла, диаметр направляющего отверстия не может его полностью «покрыть», но, с другой стороны, больший диаметр направляющего отверстия может вызвать нежелательное расслаивание в процессе сверления направляющего отверстия из-за относительно большой длины собственной поперечной режущей кромки (рис. 7.2). Диаметр направляющего отверстия, как показала практика, следует принимать равным 10–20% диаметра отверстия (табл. 7.2).

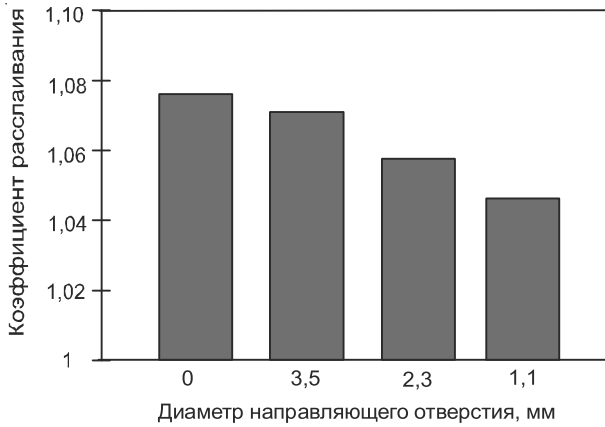



**Рис. 7.2.** Влияние диаметра направляющего отверстия на коэффициент расслаивания [12]: V = 80 м/мин; S = 0,05 мм/об; *d* = 6 мм

**Таблица 7.2.** Рекомендуемый диаметр направляющего отверстия при сверлении отверстий в ВПКМ спиральными сверлами

| Автор | Диаметр направляющего отверстия, % диаметра конечного отверстия |
|---|---|
| Tsao и Hocheng [172] | 9–20 |
| Won и Dharan [51] | 18 |
| Durão L. M. [12] | 10–20 |

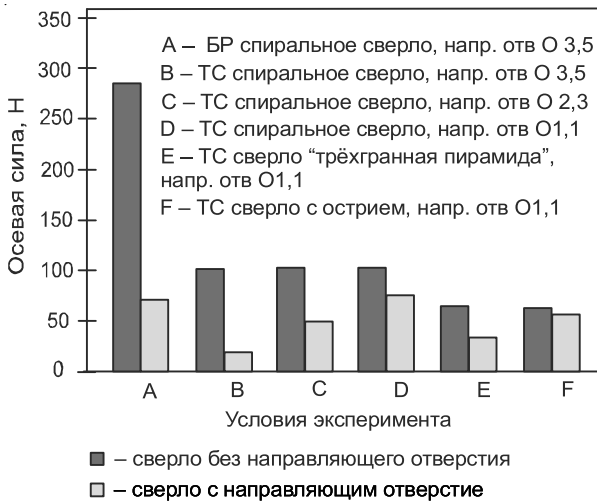



**Рис. 7.3.** Максимальная осевая сила при сверлении углепластика различными сверлами с и без направляющего отверстия [12]: V = 80 м/мин; S = 0,05 мм/об; *d* = 6 мм

Экспериментальные исследования по сверлению с направляющим отверстием различными сверлами (рис. 7.3) показали, что направляющее отверстие для большинства сверл уменьшает осевую силу более чем в два раза. Особенно сильно уменьшается осевая сила для спирального сверла с нормальной заточкой, что обеспечивает при его использовании существенное снижение вероятности расслаивания [12].

## 7.3. Применение термического воздействия на инструмент

Термическое воздействие на инструмент (его дополнительное нагревание или охлаждение), а соответственно, и на систему резания позволяет существенно улучшить обрабатываемость ВПКМ, повысить качество обработанных поверхностей, производительность процесса обработки и стойкость инструмента.

Использование предварительно нагретого инструмента значительно снижает осевую силу, что приводит к уменьшению у поверхности входа режущего инструмента области расслаивания наружных воло-

кон и позволяет уменьшить количество энергии, необходимой для сверления отверстия. Вместе с тем нагревание инструмента до или во время резания может значительно снижать сопротивление обработанной детали внешним нагрузкам [64], так как увеличение температуры спирального сверла может приводить как к глубокому вытягиванию и расслаиванию матрицы из-за возникновения термического стеклования, так и отрицательному воздействию на структурные свойства ВПКМ.

При сверлении ВПКМ может применяться предварительное охлаждение инструмента жидким азотом. В этом случае на фоне увеличения осевой силы и возникновения расслаивания, наблюдается уменьшение шероховатости отверстия, повышение качества обработанной поверхности и стойкости инструмента [32, 54, 122].

## 7.4. Нетрадиционные кинематические схемы резания

### 7.4.1. Сверление с вибрациями

Использование метода сверления отверстий в ВПКМ в сочетании с ультразвуковыми колебаниями обеспечивает возможность обработки отверстий различной формы, улучшение условий стружкодробления и стружкоотвода, снижение уровня внутренних напряжений в материале, что позволяет выполнять сверление отверстий, расположенных очень близко к краю заготовки или формировать много близко расположенных друг к другу отверстий в ВПКМ без опасности его расслаивания. Традиционный процесс сверления представляет собой в первом приближении непрерывный относительно равномерный с точки зрения силового и теплового взаимодействия инструмента с заготовкой процесс резания, для которого характерно наличие срезаемого слоя с относительно постоянными значениями толщины среза. Сверление с вибрациями отличается от традиционного сверления тем, что на обычно принятую кинематическую схему сверления накладывается дополнительное колебательное низко- или высокочастотное движение (рис. 7.4).

Сверление с низкочастотными вибрациями улучшает стружкодробление (J. Kim и I. Choi (1997), J. Kumabe (1979), D. Zhang и L. Wang (1998) [174]). Вместе с тем для процессов сверления ВПКМ и пакетов ВПКМ/металл чаще всего применяются высокочастотные (как правило, ультразвуковые) колебания, осуществляемые с помощью

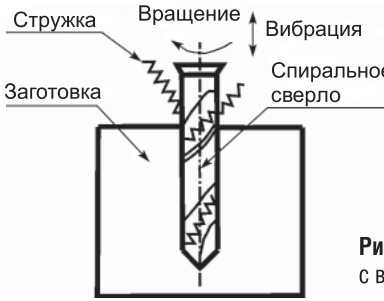



**Рис. 7.4.** Принципиальная схема сверления с вибрацией [174]

специального генератора, например, с использованием пьезоэлектрического кристалла. Сверление с вибрациями ультразвуковой частоты позволяет повысить качество обрабатываемых поверхностей; уменьшить нагревание материала; снизить вероятность «сколов» (для хрупких неметаллов) и «подтеков» (для полимеров), которые могут появляться при повышении температуры резания как результат плавления, повысить производительность обработки в 2–3 раза, а стойкость инструмента в 1,5–2 раза, увеличить срок службы (ресурса) инструмента.

Сверление с такими вибрациями является импульсным колебательным (неравномерным) процессом резания, характеризующимся переменными значениями, в зависимости от направления колебательного движения, толщины среза (при осевых колебаниях (рис. 7.5)) или скоростей резания (при крутильных колебаниях). Одной из самых важных проблем сверления с вибрациями является создание желаемого уровня частоты и амплитуды колебаний. Решением этой проблемы занималось много исследователей, например, K. Adachi et al. (1987), G. L. Chern and H. J. Lee (2006), M. Jin and M. Murakawa (2001), H. Onikura et al. (1996); H. Takeyama (1991) et al. [174]. Накопленный к настоящему времени опыт показывает, что осевая сила и крутящий момент при сверлении с вибрациями (при прочих равных условиях) меньше, чем при традиционном сверлении на 20–30% (K. Okamura et al., D. Zhang et al., L. Wang et al. [12, 32, 174]).

### 7.4.2. Прерывистое сверление

Прерывистое сверление представляет собой процесс обработки, при котором сверление периодически прерывается для вывода сверла (полностью или частично) из отверстия. Главным преимуществом этого процесса является обеспечение очистки сверла от стружки (при пол-

ном выводе сверла из отверстия) или улучшения условий стружкоотвода за счет ее дробления (при частичном выводе сверла из отверстия), что делает его универсальным для сверления практически любой комбинации материалов. По мнению J. Cordell et al. [176], в пакетах ВПКМ/металл такое сверление желательно для обеспечения возможности дробления металлической стружки на достаточно малые части, чтобы избежать задирания ВПКМ. Реализация прерывистого сверления требует комплексного управления процессом [32].

### 7.4.3. Сверление с адаптивным управлением подачей

Превалирующее влияние подачи на осевую силу при сверлении делает возможным применение адаптивного управления этим элементом режима резания для повышения качества отверстий [70]. Следует отметить, что для адаптивного управления подачей в процессе резания необходимо обеспечить непрерывный контроль (измерение) осевой силы, что позволяет создать обратную связь в системе управления и обеспечить стабилизацию значения осевой силы ниже критического значения, сводя при этом время резания к минимуму [32, 107]. Одним из существенных недостатков, разработанных на сегодняшний день систем адаптивного управления подачей, является необходимость применения датчиков силы, поскольку это усложняет конструкцию оснастки, снижает жесткость технологической системы, увеличивает деформацию системы и в результате приводит к потере точности [107].

Цикл изменения подачи, обеспечивающий при сверлении ВПКМ отсутствие расслаивания на входе и выходе сверла, предполагает уменьшение подачи на выходе сверла (т. 1 и 2) при обработке нижних слоев и последующее ее увеличение после разрушения нижнего слоя (т. 3 и 4, рис. 7.5).

При сверлении с адаптивной подачей движение сверла обычно зависит от крутящего момента и осевой силы [12, 32, 41, 58, 107]. Метод сверления с адаптивной подачей отличается от метода сверления с автоматической подачей тем, что подача сверла для каждого момента времени определяется текущими условиями и, вообще говоря, не является постоянной.

Одна из таких систем управления разработана в работе [107]. В предложенном алгоритме управления подачей можно использовать в качестве входных данных максимальную допустимую осевую силу, диапазон регулирования частоты вращения шпинделя и подачи,

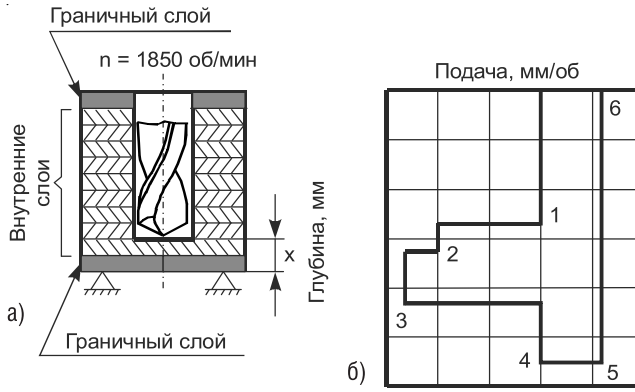



**Рис. 7.5.** Изменение подачи по глубине отверстия для обеспечения сверления без расслоения ВПКМ [107]

толщину обрабатываемой детали, диаметр и количество отверстий, ранее просверленных сверлом.

Такая система сверления позволила существенно снизить затраты времени, необходимые для сверления отверстия. Качество поверхности отверстий во многих случаях было также улучшено. Преимущества этой системы особенно значительны для частично изношенных сверл. Учитывая, что в производственных условиях большинство отверстий сверлится с помощью сверл с большим ресурсом, у такой автоматизированной системы есть потенциал, позволяющий обеспечить значительную экономию времени.

### 7.4.4. Спиральное фрезерование

Метод спирального фрезерования является альтернативным рабочим процессом обработки отверстий. Он запатентован под торговой маркой NOVATOR® и разработан L. Zackrisson, E. Persson и P. Backlund в отделе Аэронавтики Kungl Tekniska Hogskolan (KTH) [12]. Практически этот процесс также может быть назван винтовым сверлением или, по аналогии с уже устоявшимся термином «фрезоточение», фрезосверлением. Он основан на вращении режущего инструмента (концевой фрезы) вокруг его собственной оси и одновременном вращении относительно оси, которая является осью формируемого отверстия и смещена от оси ре-

жущего инструмента на величину глубины резания $t = (d - d_h)/2$ (рис. 7.6).

Одновременно с этими движениями инструмент перемещается в осевом направлении [32, 68]. На сборочных операциях спиральное фрезерование отверстий реализуется при помощи пневматических машин и специальных устройств (головок).

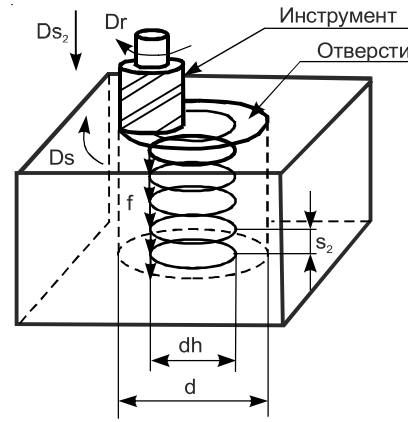



**Рис. 7.6.** Кинематика спирального фрезерования [68]

Whinnem E. представил разработку способа и головки спирального фрезерования для компании «Боинг» [177]. Мобильная головка для спирального фрезерования была разработана также и компанией «Аэробусе» [178]. Все выполненные проверки ее практического применения доказали работоспособность предложенной системы и высокое качество отверстий, обработанных этим методом. Преимущества метода состоят в уменьшении (до 50%) продолжительности цикла сверления, снижении на 50% силы сверления и повышении ресурса инструмента. Этот процесс может быть реализован на фрезерных станках с ЧПУ за счет программирования винтовой интерполяции.

Спиральное фрезерование является решением проблем формирования отверстий при окончательной сборке и обеспечивает эффективное резание без применения СОТС, отсутствие входного, выходного или межслоевого расслаивания, формирование относительно мелкой стружки, которую можно отсасывать непосредственно во время выполнения операции. K. Y. Park et al. [179] применяли метод спирального фрезерования, чтобы избежать распушивания и расслаивания.

Кроме указанных, данный метод имеет и другие преимущества:

- устранение практически невращающейся или вращающейся с недопустимо малой скоростью зоны возле центра (оси) инструмента (сверла), т.е. зоны перемычки, что позволяет существенно уменьшить осевую силу;
- снижение риска пакетирования стружки в инструменте, поскольку диаметр инструмента меньше, чем диаметр отверстия. По этой причине режущие кромки только частично и периодически находятся в контакте с поверхностью отверстия, так как зубья фрезы

работают по циклу «резание – отдых», позволяя эффективно удалять стружку и охлаждать поверхности отверстия и инструмента;
- использование одного и того же диаметра инструмента для обработки отверстий, имеющих разные диаметры;
- повышение точности отверстия, которая определяется в большей степени расположением инструмента (фрезы), а не точностью инструмента (фрезы, сверла, зенкера, развертки), снижая затраты непосредственно на инструмент.

E. Persson et al. сравнили традиционное сверление спиральным сверлом из ПКА и твердосплавным пирамидальным сверлом с методом спирального фрезерования. Испытания не выявили каких-либо заметных расслоений в ВПКМ после спирального фрезерования. Статические испытания также не выявили снижения прочности образцов с отверстиями, выполненными методом спирального фрезерования, в то время как прочность образцов с отверстиями, выполненными пирамидальным сверлом, уменьшилась на 2–3%, а образцов с отверстиями, выполненными спиральным сверлом из ПКА, на 8–10% [12].

К недостаткам спирального фрезерования можно отнести:
- обязательное изготовление направляющего отверстия, диаметр которого должен быть больше диаметра фрезы на некоторую величину $\Delta$, позволяющую обеспечить необходимое смещение оси фрезы относительно оси формируемого отверстия;
- при практической реализации спирального фрезерования пневматическими машинами и специальными головками, может возникнуть проблема обеспечения требуемого качества отверстия при выходе фрезы из отверстия, что связано с возможностью возникновения разного рода повреждений (сколов, выкрашиваний, расслаивания, вытягивания и обрывов волокнистого наполнителя и др.).

## 7.5. Сравнительная оценка технологических процессов в условиях стапельного сборочного производства летательных устройств

Все методы механической обработки отверстий могут быть в той или иной степени адаптированы к условиям стапельной сборки. Следует учитывать, что вырубка требует наличия двустороннего доступа. Для

некоторых схем сверления двусторонний доступ тоже является желательным. Остальные же методы обработки отверстий, как правило, допускают обработку с одной стороны. Наиболее приемлемым (рис. 7.7) для условий сборочного производства является метод сверления; за ним следует метод вырубки, если материал и месторасположение отверстия допускают выполнение этого вида обработки; далее следует сверление в сочетании с ультразвуковыми колебаниями; наибольшие сложности в практической реализации имеет метод спирального фрезерования [180].

При сверлении отверстий в ВПКМ возникает ряд повреждений, снижающих качество обработанной детали: вытягивание и обрыв волокон, расслаивание, трещины, термическая деструкция, недопустимо высокая шероховатость поверхности, размерная точность отверстия, погрешность формы и др.

При выборе варианта технологического процесса следует учитывать, что некоторые дефекты (шероховатость, деструкция и др.) могут быть устранены последующей чистовой обработкой (развертками, абразивным инструментом и т.п.), но есть дефекты, например, расслаивание, которые при дальнейшей обработке могут быть устранены лишь частично.

Качество обработки отверстий можно также повысить за счет рационального выбора инструментального материала, конструкции инструмента, оптимизации геометрических параметров и режимов

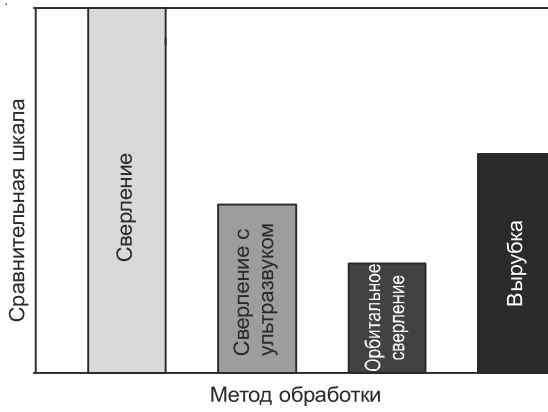



**Рис. 7.7.** Приспособленность методов обработки к реализации в условиях стапельного сборочного производства [180]

резания. Кроме того, качество отверстий можно улучшить за счет создания специальных технологий их обработки, учитывающих специфические свойства ВПКМ и характеристики деталей, а также их взаимное расположение в собираемой конструкции.

При выборе инструментального материала предпочтение отдают материалу, имеющему высокую износостойкость и малый радиус округления режущих кромок. На рис. 7.8 приведены сравнительные данные о качестве обработанных отверстий в зависимости от метода обработки.

В литературных источниках практически полностью отсутствуют данные, позволяющие сравнить производительность различных методов обработки хотя бы при сходных (одинаковых) условиях. В лучшем случае исследователи сравнивают различные выходные показатели процессов формирования отверстий для инструментов одного и того же типа.

В информационных источниках в большинстве случаев все сравнения сводятся, можно сказать, к заведомо проигрышному варианту получения отверстий при помощи спирального сверла с нормальной заточкой. В то же время практически все исследователи подтверждают, что повышение качества обработки чаще всего требует существенного увеличения времени на ее реализацию, что связано как с необходимостью реализации нескольких переходов, так и с необходимостью снижения осевой силы при сверлении (рис. 7.9).

Если не рассматривать метод вырубки как метод, имеющий существенные технологические и конструктивные ограничения, то в каче-

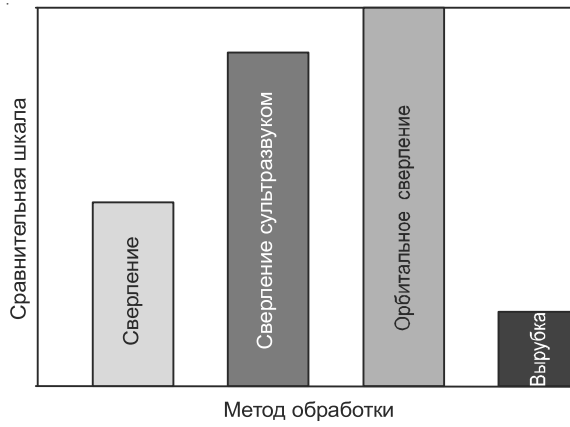



**Рис. 7.8.** Соотношение качества обработанных отверстий с применением различных методов [180]

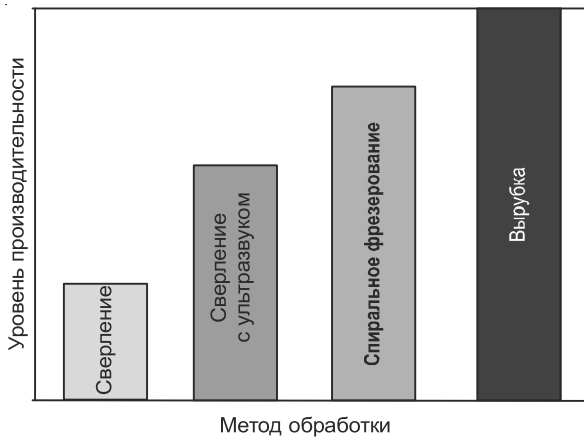



**Рис. 7.9.** Соотношение производительности обработанных отверстий с применением различных методов [180]

стве потенциально наиболее производительного метода следует выделить метод спирального фрезерования. Перспективным является метод сверления в сочетании с ультразвуковыми колебаниями. В то же время использование этих методов затруднено в условиях ручной сборки. Оптимальными вариантами, на наш взгляд, являются те, которые допускают использование этих методов в сочетании с промышленными роботами, либо специальной оснасткой (типа кондукторов), позволяющих снизить нагрузку на человека и реализовать высокие возможности по производительности и точности.

Интегрированную оценку различных методов обработки отверстий по степени приспособленности к условиям ручной сборки, качеству и производительности можно представить в виде диаграммы, приведенной на рис. 7.10.

Рассмотрим конкретный пример, предположив, что полная заработная плата работника (в среднем для стран, входящих в ЕС) составляет 40$ в час, и сверла из быстрорежущей стали и твердого сплава стоят 2,57 и 17,12 дол. соответственно. Предполагается, что среднее время замены инструментов, а также время загрузки и выгрузки детали составляет 3 минуты. Тогда влияние режима резания на себестоимость процесса сверления смешанного пакета Gr/Bi–Ti различными сверлами можно представить в виде диаграммы, изображенной на рис. 7.11. Видно, что наименьшей и мало зависимой от режимов резания (подачи и скорости резания) является себестоимость формирования отверстия твердосплавными сверлами, в то время как на себестоимость

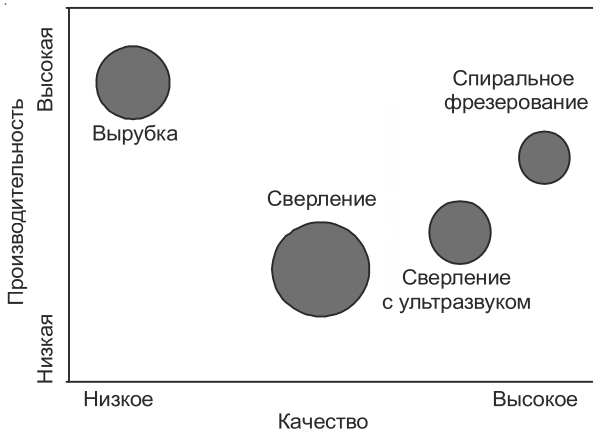



**Рис. 7.10.** Соотношение производительности обработанных отверстий с применением различных методов [180]. Размер окружности определяет степень приспособленности метода к условиям обработки ручным инструментом

сверления быстрорежущими сверлами существенное влияние оказывает подача [43].

Сравнительный анализ по полной стоимости соответствующего технологического процесса еще более затруднен, чем анализ производственных расходов (рис. 7.12, 7.13).

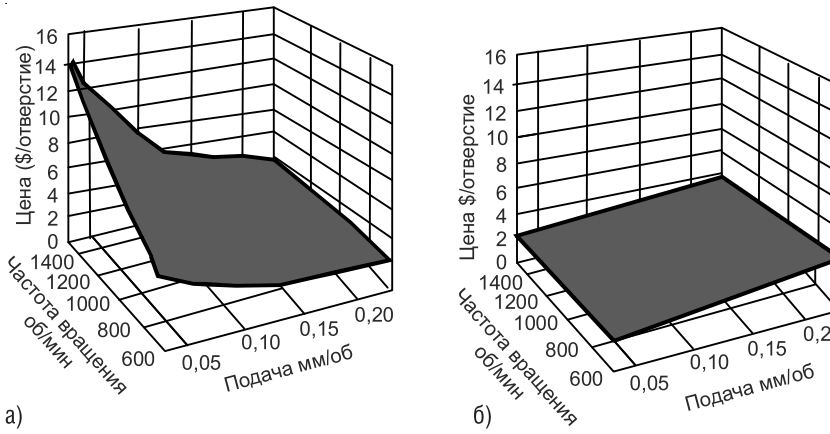



**Рис. 7.11.** Влияние подачи и скорости резания на себестоимость сверления быстрорежущими (а) и твердосплавными (б) сверлами [43]

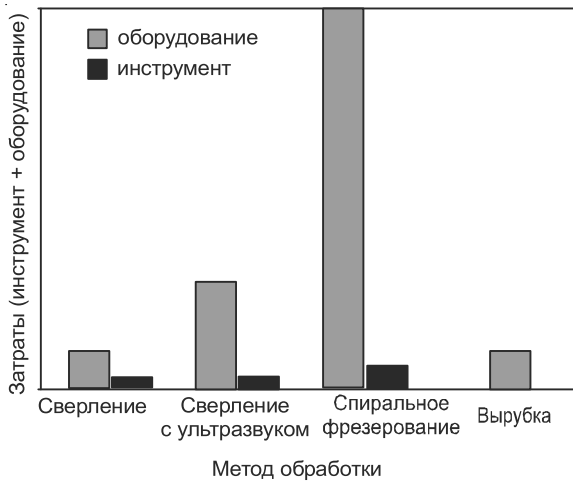



**Рис. 7.12.** Сравнение абсолютных затрат на оборудование и инструмент для различных методов механической обработки [180]

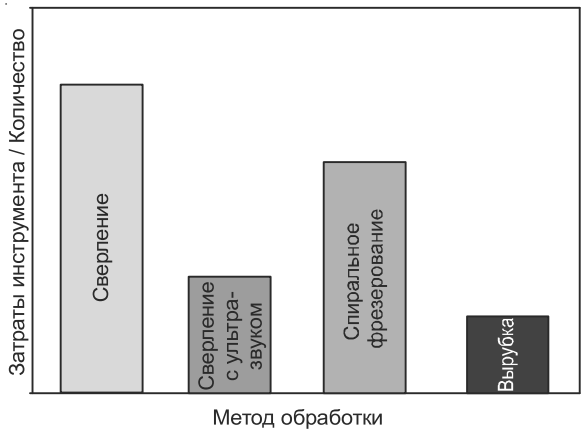



**Рис. 7.13.** Суммарные затраты на обработку одного отверстия [180]

Одним из самых дешевых во всех отношениях методов является метод вырубки. Однако данный метод в силу ограничений по применимости для тех или иных обрабатываемых материалов и доступу к зоне обработки очень часто в условиях сборочного производства не может быть реализован.

Метод спирального фрезерования является перспективным в силу высокого качества обрабатываемых отверстий и легкой адаптации к изменяющимся условиям. Он является достаточно привлекательным

(в сравнении со сверлением) и по удельным затратам на инструмент. В то же время требуются большие удельные затраты на реализацию данного метода, даже с учетом его высокой производительности. Также этот метод имеет ограничения с точки зрения применимости в условиях обработки ручным инструментом.

Метод сверления с наложением ультразвука также позволяет рассчитывать на хорошие итоговые показатели экономической эффективности, но необходимость применения для его реализации относительно дорогих ультразвуковых генераторов и дополнительных специальных устройств, для закрепления инструмента, влечет за собой увеличение затрат на основные фонды, что является существенным сдерживающим фактором для его внедрения.

Вместе с тем, несмотря на относительно большое количество недостатков, присущих традиционному процессу сверления, этот метод формирования отверстий в сборочном производстве все еще является наиболее применяемым, поскольку в реально существующих условиях он обеспечивает наилучшее сочетание показателей производительности и качества.

## Выводы

Обработка ВПКМ и пакетов ВПКМ/металл, как и любой другой процесс механической обработки, требует применения различных технологических приемов с целью обеспечения требуемого качества изделия. К наиболее эффективным и прогрессивным из применяемых приемов следует отнести следующие из них.

1. Применение опорной пластины направлено на минимизацию расслаивания (наружных волокон на выходе из отверстия).
2. Выполнение направляющего отверстия является эффективным способом борьбы с расслаиванием, так как уменьшает осевую силу более чем в два раза.
3. Применение термического воздействия на инструмент неоднозначно и противоречиво, так как нагревание ухудшает шероховатость и механические свойства ВПКМ, а охлаждение повышает степень расслаивания, но улучшает показатели шероховатости.
4. Использование сверления с вибрациями позволяет улучшить процесс дробления стружки и ее отвода, снижает температуру обработки и осевую силу, повышает стойкость инструмента.

5. Использование систем адаптивного управления подачей позволяет существенно снизить затраты времени, необходимые для сверления отверстий, а также повысить их качество.
6. Прерывистое сверление, заключающееся в циклическом извлечении инструмента из зоны резания, хорошо зарекомендовало себя при сверления пакетов ВПКМ/металл, так как позволяет обеспечить эффективное стружкодробление и избежать повреждения стенок отверстия в слое ВПКМ.
7. Спиральное фрезерование является решением проблем формирования отверстий при окончательной сборке и обеспечивает эффективное резание без применения СОТС, отсутствие входного, выходного или межслоевого расслаивания, формирование относительно мелкой стружки, которую можно отсасывать непосредственно во время выполнения операции.
8. Сравнительная оценка различных методов получения отверстий в пакетах ВПКМ/металл показала преимущество спирального фрезерования и сверления с высокочастотными вибрациями над другими методами обработки.

РАЗДЕЛ 8

# Оборудование для обработки отверстий

Операции по образованию отверстий могут выполняться как на одном, так и на разном оборудовании. В соответствии с этим различают оборудование для раздельного и совместного выполнения операций. К первому виду относят, например, сверлильные станки, клепальные прессы и т. п.; ко второму – сверлильно-зенкеровальные установки, сверлильно-клепальные автоматы и др.

В зависимости от вида обрабатываемого изделия, условий, в которых будет выполняться обработка, и предъявляемых к изделию требований может быть использовано стационарное (станки) или переносное (ручные машины) оборудование. Как правило, стационарное оборудование является более предпочтительным, так как его использование позволяет улучшить условия труда, повысить производительность труда и качество продукции.

Кроме стационарного и переносного оборудования, в некоторых случаях используют встраиваемое оборудование, которое монтируют непосредственно в сборочных приспособлениях и применяют вместо ручных машин.

Основными показателями, характеризующими эффективность применения сверлильно-клепального оборудования, являются универсальность и уровень автоматизации (автомат/полуавтомат) оборудования, а также обратимость, под которой понимают возможность его использования при смене обрабатываемых изделий.

Универсальное оборудование предназначено для обработки различных изделий, отличающихся размерами, марками материала, предъявляемыми к ним требованиями и др. Поэтому полная автоматизация универсального оборудования ведет к чрезмерному усложнению его конструкции и, как правило, экономически себя не оправдывает. Из-за низкого уровня автоматизации производительность уни-

версального оборудования относительно невысокая. Однако в условиях большой номенклатуры изделий это оборудование имеет важное достоинство – обратимость.

Наивысший уровень автоматизации и наибольшую производительность имеет специальное оборудование, предназначенное для обработки единственного вида изделий. В мелкосерийном производстве коэффициент загрузки специального оборудования невелик, а при смене объекта производства его практически невозможно повторно использовать, т. е. оно необратимо. Кроме того, стоимость проектирования, изготовления и наладки специального оборудования высока, а необходимое для этого время зачастую превышает время производства изделия.

Специализированное оборудование, предназначенное для обработки определенной группы изделий, занимает промежуточное положение между универсальным и специальным оборудованием. По производительности и степени автоматизации специализированное оборудование приближается к специальному, а по степени обратимости – к универсальному.

Из изложенного, однако, не следует вывод о невозможности использования специального оборудования в условиях мелкосерийного производства. Наиболее рациональным является использование специального автоматизированного оборудования, расчлененного на отдельные унифицированные элементы.

Применение при проектировании автоматизированного оборудования (как специального, так и специализированного) из унифицированных элементов позволяет сделать его в определенной степени обратимым. В случае необходимости такое оборудование можно частично или полностью демонтировать, а составляющие элементы использовать для создания нового оборудования. Это позволяет увеличить количество выпускаемого автоматизированного оборудования и снизить его стоимость в 2–3 раза. Уровень унификации элементов конструкции в настоящее время достигает 60–70%.

Применение ЧПУ повышает уровень автоматизации сверлильно-зенкерования и клепального оборудования и позволяет существенно повысить производительность труда.

## 8.1. Портативные ручные машины

Для выполнения механизированных ручных работ по изготовлению отверстий применяют портативные ручные машины [3]: сверлильные, развертывающие, протяжные. В зависимости от назначения они имеют различную кинематику движения рабочих органов. По конструктивному исполнению различают машины с рукояткой пистолетного типа и угловые машины. По виду привода машины разделяют [17]: с ручной подачей (дрели), с механической подачей, электрические, пневматические, гидравлические. Из-за необходимости соблюдения мер безопасности при сборке ЛА чаще всего применяют машины с пневматическим приводом.

Дрель (рис. 8.1) является наиболее простым устройством для сверления отверстий. Инструмент чаще всего закрепляется с помощью кулачкового сверлильного патрона. В зависимости от модели эти машины могут обеспечивать регулировку лишь частоты вращения шпинделя от 600 до 3000 об/мин[1].

Для сверления отверстий применяют также сверлильные машины с механизированной подачей (рис. 8.2). В труднодоступных местах используются сверлильные угловые машины со сменными насадками и с уменьшенными размерами патронов.

**Рис. 8.1.** Типовая пневматическая дрель фирмы Cooper Power Tools [4]

В зависимости от конкретного технологического процесса сборки сверление отверстий может сочетаться с зенкерованием. Для зенкерования с автоматической подачей применяются сверлильно-зенкеровальные машины. Технические характеристики некоторых таких машин представлены в табл. 8.1. Интересно, что машины

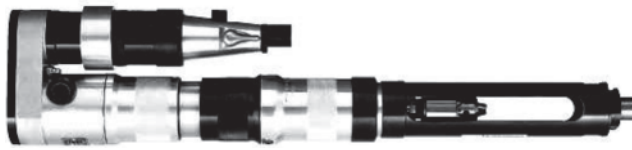


**Рис. 8.2.** Типовая сверлильная машина фирмы Cooper Power Tools[2]

[1] Каталог Cooper Power Tools SP-1006.
[2] Каталог Cooper Power Tools SP-1300

**Таблица 8.1.** Техническая характеристика некоторых сверлильных машин с автоматической подачей [17][1]

| Модель | Выполняемые операции | Обрабатываемые материалы | Наибольший диаметр отверстий, мм | Мощность, Вт | Частота вращения шпинделя, $с^{-1}$ | Подача, мм/об | Ход шпинделя, мм | Габаритные размеры, мм | Масса, кг |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| МСП-12-1 | Сверление и зенкерование | А | 12<br>22 | 650 | 21,3 | 0,01…1,00 | 40 | 330x97x230 | 4,8 |
| МСП-12Т | Сверление и зенкерование | Т | 12<br>22 | 200 | 1,3 | 0,01…1,00 | 40 | 358x97x230 | 4,8 |
| МСП-12К | Сверление и зенкерование | ВПКМ | 12<br>14 | 560 | 18,3 | 0,01…0,65 | 40 | 325x74x220 | 3,8 |
| 15QD-S125 | Сверление | А, Т, С | 9,5<br>7,9<br>7,9 | – | 50,0 | 0,012…2,0 | 32 | – | 3,2 |
| 158QGD-S265 | Сверление | А, Т, С | 12,7<br>9,5<br>9,5 | – | 60,0 | 0,012…2,0 | 67 | – | 5,7 |

*Примечание*: А – алюминиевые сплавы, Т – титановые сплавы, С – высокопрочные стали.

[1] Каталог Cooper Power Tools SP-1300

реализуют подачу в достаточно широком диапазоне – от 10 до 2000 мкм/об. Частота вращения шпинделя часто фиксированная и, следовательно, изменяется с изменением диаметра сверла. В связи с этим машины выпускаются ориентированными под обрабатываемый материал. Чем меньше максимальный диаметр сверления, тем больше частота вращения шпинделя сверлильных машин. Машины, ориентированные на применение твердосплавного осевого инструмента, позволяют развивать такие частоты вращения, которые обеспечивают скорость резания более 100 м/мин.

Пневматические ручные машины постоянно совершенствуются. Постоянно улучшаются санитарно-гигиенические, энергетические и расходные характеристики. Особенностью современных сверлильных машин является наличие контроля перегрузки инструмента, автоматический подвод и вывод инструмента из отверстия, контроль глубины сверления[1].

Для сверления с прерывистой подачей применяются специальные сверлильные машины (рис. 8.3).

Механизированное развертывание отверстий осуществляется развертывающими машинами, например, типа МР (табл. 8.2). Модель развертывающей машины выбирают в зависимости от диаметра обрабатываемого отверстия, материала пакета и подходов к отверстию.

В условиях агрегатно-сборочных работ в качестве оборудования для протягивания применяются передвижные пневмогидроусилители с протяжными пистолетами или протяжные машины [17]. По кон-

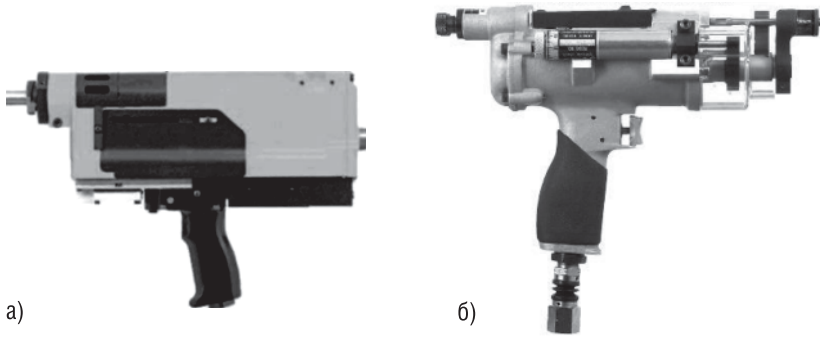



**Рис. 8.3.** Машины фирмы Cooper Power Tools [4]: а – типовая сверлильная машина для прерывистого сверления; б – сверлильно-зенкеровальная машина

[1] Каталог Cooper Power Tools SP-1300

**Таблица 8.2.** Техническая характеристика некоторых развертывающих машины типа МР [17]

| Модель | Исполнение | Диаметр обрабатываемых отверстий, мм | Частота вращения шпинделя, об/мин | Мощность, Вт | Габаритные размеры, мм | Масса, кг |
|---|---|---|---|---|---|---|
| МР-8У | Развертывающая угловая | 8 | 400 | 180 | 325х52х58 | 1,6 |
| МР-12 | Развертывающая | 12 | 300 | 280 | 248х55х152 | 1,3 |
| МР-12У | Развертывающая угловая | 12 | 300 | 250 | 335х55х75 | 2,1 |

**Таблица 8.3.** Техническая характеристика некоторых протяжных машин [17]

| Модель | Дополнительные движения инструмента | Диаметры отверстий, мм | Усилие протягивания, кН | Рабочий ход, мм | Габаритные размеры, мм | Масса, кг |
|---|---|---|---|---|---|---|
| МП-12-150 | – | 8…12 | 24 | 150 | 448х52х199 | 2,2 |
| МПВ-12-150 | Вращение | 8…12 | 17 | 150 | 448х52х199 | 2,7 |

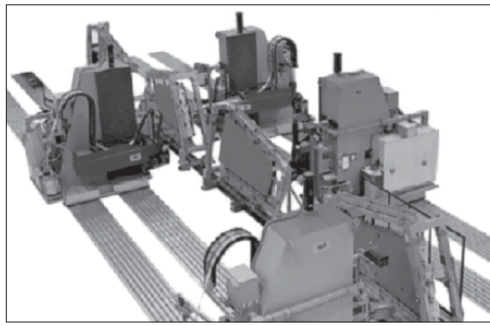
структивному исполнению и технологическим требованиям протяжные машины делятся на два типа – для протягивания отверстий с принудительным вращением протяжки (МПВ) и для протягивания отверстий методом осевого протягивания (МП). Технические характеристики некоторых протяжных машин приведены в табл. 8.3. Следует отметить, что для обработки отверстий в ВПКМ машины для протягивания отверстий методом осевого протягивания практически не применяются.

## 8.2. Стационарные машины и агрегаты

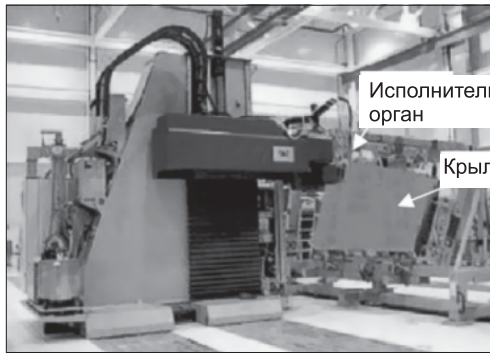
Для обработки большого количества отверстий применяются автоматизированные стационарные установки, оснащенные сверлильно-зенкеровальными устройствами, многокоординатные и радиально-сверлильные станки [3]. Специфика конструкции и значительные габаритные размеры узлов, панелей и отсеков ЛА часто делают невозможным применение универсальных сверлильных станков. Сверлильно-

зенкеровальные установки (СЗУ), как правило, комплектуются из двух унифицированных агрегатов – сверлильно-зенкерковального агрегата (СЗА) и поддерживающего агрегата (АП). При необходимости АП в СЗУ может быть и специальным [17].

СЗА – относительно большие и сложные установки, стоимость которых достаточно высока [4, 169]. Поэтому для окупаемости инвестиций необходимо, чтобы эти установки выполняли большое количество отверстий. Например, одна их таких установок показана на рис. 8.4. Эта машина, оснащенная ЧПУ, обладает достаточной жесткостью, которая позволяет обрабатывать точные отверстия с малыми позиционным отклонением и допуском перпендикулярности. В этой машине используется система машинного зрения, которая позволяет уточнить отклонения от номинального положения отверстий, что позволяет отказаться от применения кондукторных плит. Режимы резания устанавливаются автоматически и могут изменяться в зависимости от обрабатывае-



а)




б)

**Рис. 8.4.** Сверлильно-зенкеровальный агрегат [4]: а – четыре независимые сверлильные стойки; б – сверлильная стойка

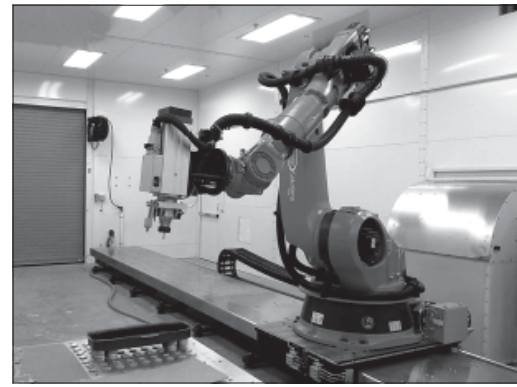


**Рис. 8.5.** Промышленный робот [4]

мого слоя и материала. При сверлении толстых пакетов существует возможность применения жидкостного или воздушного охлаждения. Все параметры процесса обработки регистрируются датчиками и сохраняются для контроля качества. Контроль инструментов осуществляется по штрих-кодам. Машина может устанавливать контрольные заклепки для обжатия пакетов, выполнять сверление как обычными сверлами, так и комбинированным инструментом.

Современной тенденцией в промышленности является замена таких громоздких установок меньшими и более гибкими. Все большее применение находят промышленные роботы, оснащенные сверлильными модулями (головками) (рис. 8.5). Другим подходом является интегрирование в сборочное приспособление (рис. 8.6) модулей сверления (рис. 8.7) со сверлильными головками (рис. 8.8) с обеспечением их перемещений в области обработки отверстий по направляющим. Такое приспособление, например, применяется для сборки передней части фюзеляжа (рис. 8.6).

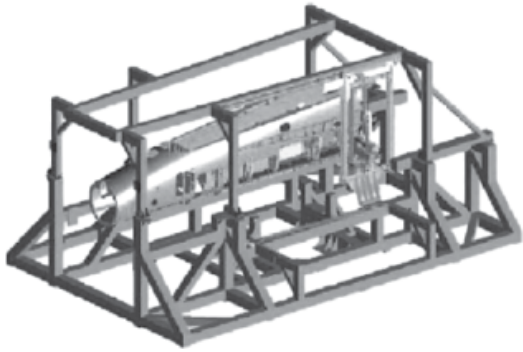


**Рис. 8.6.** Приспособление с интегрированным модулем сверления для сборки передней части фюзеляжа [4]

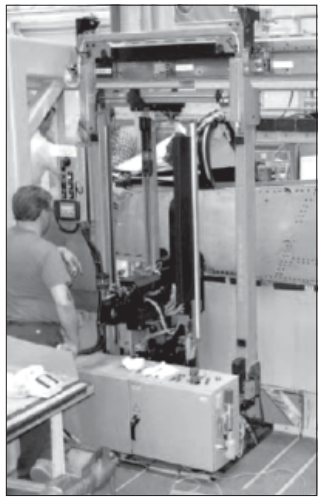


**Рис. 8.7.** Интегрированный модуль сверления [4]

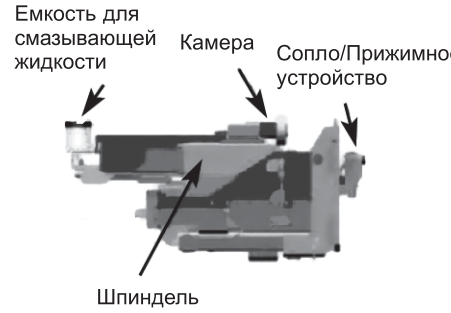



**Рис. 8.8.** Сверлильная головка

Еще одной современной тенденцией является применение клепальных автоматов (АК), которые обеспечивают за один автоматический цикл заклепочное соединение, выполняя все операции технологического процесса: сверление, зенкерование, вставка заклепки, образование замыкающей головки, зачистка закладной потайной головки, контроль и герметизация. При этом перемещение узлов и панелей на шаг заклепок может осуществляться как в автоматическом режиме по программе, так и вручную. Такие установки, оснащенные ЧПУ, выпускаются в широком диапазоне габаритных размеров исходя из размеров собираемых изделий, и позволяют устанавливать, например, стрингеры на всю длину крыльев ЛА (рис. 8.9).

Для выполнения соединения на автоматах к соединяемым конструкциям предъявляются особые требования по технологичности [21]:

1. Конструкция узлов и панелей должна обеспечить свободное перемещение силовых агрегатов АК в зоне клепки.
2. В пакетах из разнородных материалов листы или профили из более прочного материала не следует располагать между листами меньшей прочности, так как это может повлечь увеличение диаметра отверстий со стороны входа сверла.
3. Наибольшие размеры собираемых узлов зависят как от конструктивных особенностей автомата, так и от геометрической формы

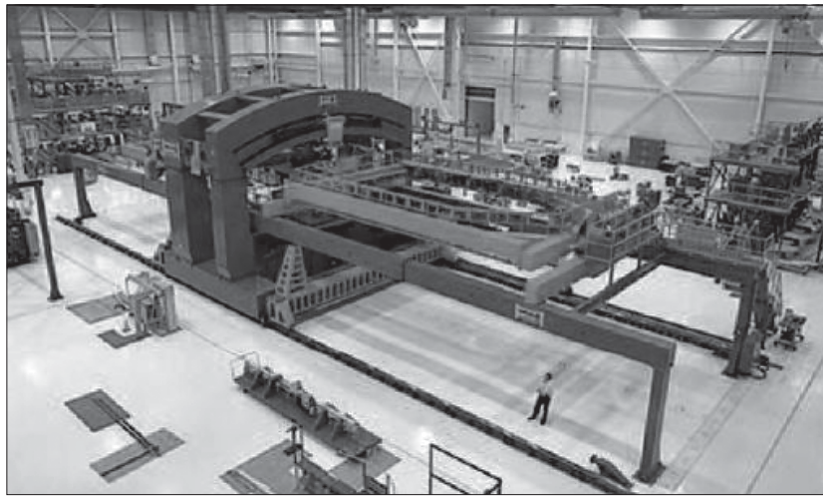


**Рис. 8.9.** Автоматизированный клепальный автомат [4]

узлов (плоские, цилиндрические, конические). Увеличение ширины ухудшает обзор зоны клепки на автоматах без ЧПУ.

4. Клепку на автоматах рекомендуется производить заклепками-стержнями со скруглениями по торцам. Заклепки должны быть расположены по рядовым швам. В случае многорядных (двух-, трех- и более) швов расстояние между рядами должно быть не менее 20 мм.
5. Для продольных и поперечных элементов жесткости в панелях и узлах необходимо применять только открытые профили. При этом отклонение размеров полок должно находиться в пределах ±0,5 мм.
6. Узлы и панели, а также применяемые в них заклепки, должны быть изготовлены из алюминиевых сплавов.
7. Типы и размеры заклепок должны полностью соответствовать технической документации. Для свободного прохода заклепок в отверстия необходимо применять заклепки со скругленными торцами, например по ОСТ 1 34044-80 «Заклепки универсальные для автоматической клепки».
8. В конструкциях узлов и панелей, предназначенных для автоматической клепки, нельзя применять двухстороннюю потайную клепку.
9. Для обеспечения стабильного качества заклепочное соединение должно иметь толщину в пределах 0,8–3,0 диаметра стержня заклепки.

Почти все сверлильно-зенкеровальное оборудование собирают из унифицированных элементов. Установки для сверления и зенкерования отверстий в плоских узлах и панелях компонуют из универсальных сверлильных станков, сверлильно-зенкеровальных агрегатов, унифицированных каркасных элементов, элементов сборочных приспособлений и систем управления.

Современное сверлильно-зенкеровальное оборудование позволяет реализовать технологию механической обработки замкнутого типа, где работа станка начинается с электронного чертежа, получаемого, как правило, от клиента [169]. На чертеже должны быть изображены геометрические данные конечного продукта. На первом этапе создания такого оборудования с помощью CAD-системы строится трехмерная модель обрабатываемых поверхностей. После этого создается технологический процесс с определенной последовательностью технологических операций, на основе которой строятся траектории перемещения инструментов в процессе сборочной операции. Используя динамическое отображение траектории соответствующего инструмента, операторы могут визуально проверить программу, разработанную для станка с ЧПУ, а также наличие необходимых зазоров и удостовериться, что все размеры выдержаны. После выполнения программы обрабатываемая деталь может быть без демонтажа проконтролирована с помощью контактного датчика, установленного в шпинделе. При необходимости деталь может быть повторно обработана на станке без переустановки или перезакрепления. Результаты этого осмотра автоматически используются для окончательного создания трехмерной модели проверенных поверхностей.

При сравнении полученного изделия с исходной трехмерной моделью можно выявить любые отклонения размеров. Этот способ обработки данных помогает выявить места, где требуются дополнительные проходы. Окончательный осмотр может быть выполнен непосредственно на станке.

Обработка замкнутого типа позволяет сократить до 80% расход времени на осмотр и контроль собранного изделия. Вместе с тем относительно небольшая экономия времени наблюдается при перемещении детали и ее дополнительных установок. Объединение осмотра и механической обработки позволяет снизить основное время производственного цикла на 30% [169].

## 8.3. Машины для обработки отверстий методом спирального фрезерования

Спиральное фрезерование является прогрессивным процессом обработки отверстий в ВПКМ и смешанных пакетах, состоящих из ВПКМ, титановых и алюминиевых сплавов, различных сталей (п. 7.5.4). Машины для спирального фрезерования обеспечивают быстрое вращение шпинделя с одновременной осевой и круговой подачами фрезы относительно оси отверстия. Конструкции машин для спирального фрезерования и способы их фиксации на кондукторных плитах описаны в патентах US 2003/0049085 A1, US 6758642 B2, US 2003/0143049 A1, US7614159 B2, US7627940 B2. Пример конструкций головки для спирального фрезерования приведен на рис. 8.10.

Машины для спирального фрезерования делятся на две группы: портативные (*Orbital Portable*) и обрабатывающие головки (модули) (*Orbital End Effectors*). Основные технические характеристики некоторых машин для спирального фрезерования приведены в табл. 8.4.

Портативные машины для спирального фрезерования имеют малый вес и для выполнения отверстия присоединяются к кондукторным плитам, закрепленным на собираемом узле. Обрабатывающие головки устанавливаются в качестве рабочего органа на станках и роботах.

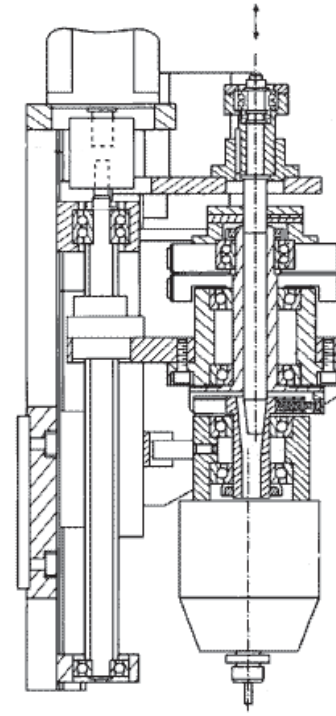


**Рис. 8.10.** Пример конструкций головки для спирального фрезерования (патент US7627940 B2)

**Таблица 8.4.** Основные технические характеристики некоторых машин для спирального фрезерования

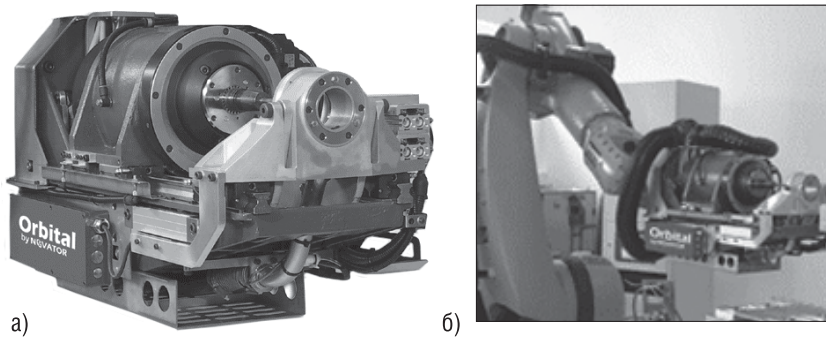
| Модель | Назначение | Максимальный диаметр отверстия, мм | Масса, кг | Максимальная глубина обработки отверстия, мм | Частота вращения шпинделя, об/мин | Осевая подача, мм/мин | Круговая подача, об/мин |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P-M60 | портативная | 25 | 10 | 60 | 1800–4500 | 10–600 | 20–80 |
| E-D100 | для станка | 25 | 130 | 100 | 0–30000 | 0–600 | 0–400 |

Портативные машины для спирального фрезерования бывают автоматическими и полуавтоматическими. В автоматических машинах предусматривается функция программного задания глубины и диаметра обрабатываемого отверстия. В то же время в полуавтоматических машинах эти параметры настраиваются вручную механическим смещением органов управления.

Хорошим примером портативных машин для спирального фрезерования являются машины M-серии фирмы Novator (рис. 8.11).

В этих машинах предусмотрено автоматическое регулирование подачи и частоты вращения шпинделя. Параметры режима резания могут задаваться для каждого слоя смешанного пакета индивидуально. Привод шпинделя пневматический, приводы подачи и спираль-

**Рис. 8.11.** Портативная машина P-M60 для спирального фрезерования (http://www.novator.nu/Products_Services.asp)




а) б)

**Рис. 8.12.** Модуль для спирального фрезерования E-D100 фирмы Novator (http://www.novator.nu/Products_Services.asp)

ного движения – электрические. Максимальная глубина отверстия составляет 60 мм. В машинах для спирального фрезерования предусмотрена возможность подачи воздуха через шпиндель или MQL-смазка, а также вакуумный пылеотсос и RFID-идентификация отверстий.

Обрабатывающие головки или модули для спирального фрезерования разработаны для стационарных станков (рис. 8.12а) или промышленных роботов (рис. 8.12б). За счет малой осевой силы орбитальные головки могут применяться вместе с легкими промышленными роботами в автоматизированном производстве. Головки портативных машин для спирального фрезерования имеют механизм, позволяющий изменение эксцентриситета непосредственно в процессе обработки. Это делает возможным обработку не только конических отверстий, но и отверстий более сложной формы.

## 8.4. Приспособления агрегатно-сборочного производства

Точность базирования при сборке ЛА обеспечивается с помощью специальных сборочных приспособлений. Наряду с обеспечением требуемого взаимного расположения деталей сборочные приспособления позволяют придать требуемую форму деталям и узлам, имеющим невысокую жесткость конструкции. Кроме того, в приспособлениях могут быть предусмотрены элементы, исключающие необходимость разметки или пригонки деталей.

Одной из основных функций такого приспособления является обеспечение взаимозаменяемости узлов, которая достигается взаимной увязкой элементов конструкции узлов и приспособлений для их сборки [3].

Классические сборочные приспособления представляют собой сварные рамы с пролетами, как правило, не более 500 мм. В процессе проектирования приспособления детально анализируются базы для закрепления деталей и погрешности их установки и закрепления. Для каждого нового изделия проектируется уникальное (специальное) приспособление. После изготовления приспособления выполняется его окончательная калибровка. На рис. 8.13 изображено классическое сборочное приспособление.

Для временного базирования деталей, соединяемых при сборке, применяются штифтовые крепления, которые вставляются в контрольные отверстия. Временное соединение деталей при сборке осуществляется зажимными устройствами: винтовыми, клиновыми, кулачковыми, пневматическими и вакуумными. Для базирования угловых кронштейнов и других фасонных деталей применяют профильные плиты.

Традиционные приспособления применяются давно, и особенности их конструкций уже достаточно хорошо известны. Если у конст-

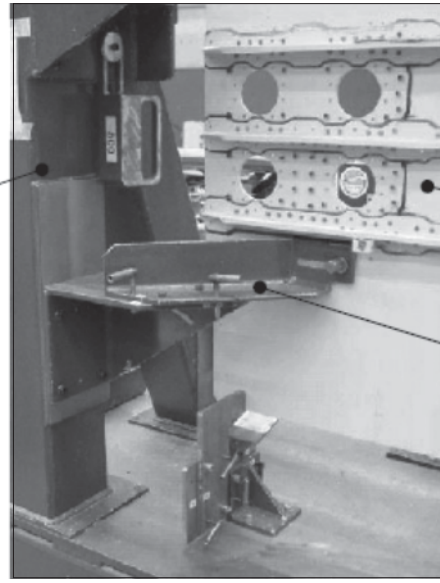
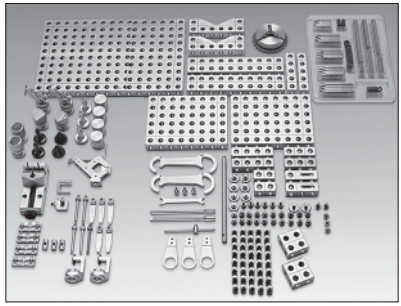



**Рис. 8.11.** Классическое сборочное приспособление [170]

руктора есть возможность оснастить приспособление дополнительным элементом, например, для повышения жесткости, тогда такое приспособление может являться хорошим выбором, позволяющим отказаться от проектирования специального приспособления. Однако из-за того, что традиционные приспособления чаще всего являются сварными, они, как правило, не могут перенастраиваться и сложно поддаются модернизации. Таким образом, для каждой новой авиационной конструкции необходимо новое приспособление. Когда продукция снимается с производства, приспособления чаще всего утилизируются, так как для их хранения, как правило, требуются значительные площади. Причиной для изготовления нового приспособления может послужить и изменение программы выпуска или принципа построения технологического процесса сборки продукции.

Поскольку для каждой операции должно быть разработано отдельное приспособление, стоимость оборудования для одного ЛА достаточно большая. Burley et al. [170] утверждает, что примерно 10% общих затрат на производство каждого планера можно отнести к производству и эксплуатации сборочных приспособлений, креплений и прочей оснастки. В настоящее время стадия разработки для гражданской авиации обычно длится два-четыре года [171]. В последнее время в авиационном сборочном производстве для сокращения расходов применяются новые типы приспособлений, в частности универсально-сборные приспособления (УСП). Концепция использования этих приспособлений предполагает сборку приспособления необходимой конструкции из стандартных элементов (рис. 8.14). Оптимизация конструкций стандартных элементов может обеспечить сокращения их



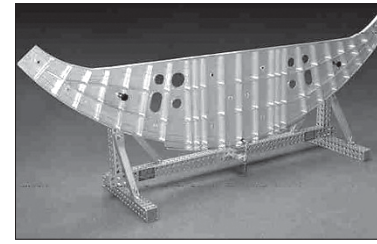


**Рис. 8.14.** Комплект деталей универсально-сборного приспособления из ВПКМ компании Alufix (а) и собранное из них приспособление для контроля

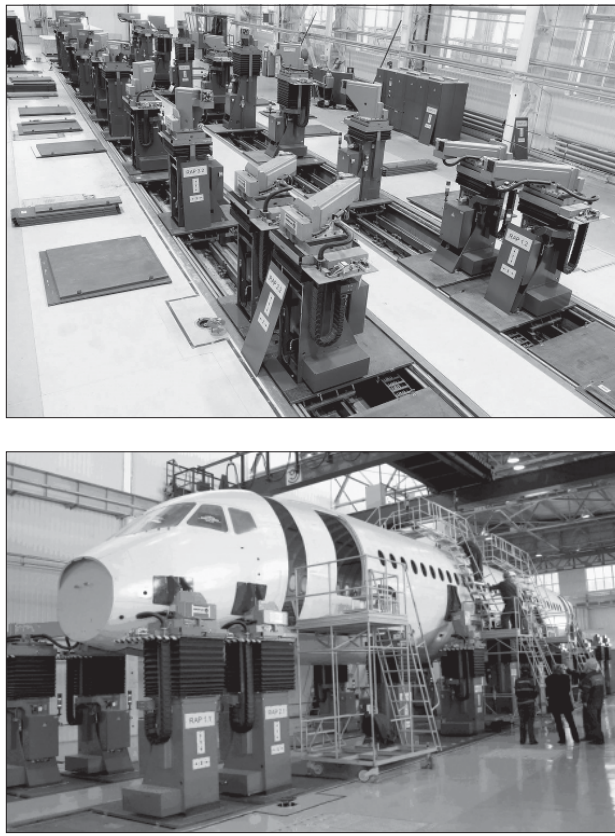


**Рис. 8.15**. Стенд стыковки фюзеляжа на ОАО «КнААПО»

массы (особенно при их изготовлении из ВПКМ) и времени сборки до 20% от традиционного[1].

Перспективным этапом дальнейшего развития УСП является процесс автоматизации их сборки при помощи роботов. Этот подход является первым шагом на пути к созданию реконфигурируемых приспособлений. Применение роботов является более дешевым по сравнению с ручной сборкой и наладкой приспособлений [170].

[1] По материалам сайта : http://www.aerospace-technology.com/contractors/manufacturing/horst-witte.

В последние годы вводятся в эксплуатацию реконфигурируемые программно-управляемые приспособления, обеспечивающие полную автоматизацию настройки приспособления для заданной конструкции в очень короткие сроки. Например, стенд стыковки фюзеляжа с лазерной системой измерения, используемый на ОАО «КнААПО»[1] в производстве регионального самолета, обеспечивает сборку фюзеляжа всех его модификаций (рис. 8.15). Отдельные секции фюзеляжа устанавливаются на опорные колонны, выравниваются с помощью лазерной системы измерений и автоматически позиционируются в необходимое положение стыковки. В этом стенде для монтажа стапелей и контроля агрегатов в процессе их сборки используются лазерный треккер фирмы Leica совместно с мобильной контрольно-измерительной аппаратурой и лазерный радар фирмы Metris.

## Выводы

Изложенное выше позволяет сделать такие выводы:

1. Сегодня существует большой ассортимент устройств, применяемых в сборочном производстве летательных аппаратов для изготовления отверстий и сборки ЛА. Можно выделить четыре основных группы: портативные машины, стационарные машины, машины для обработки отверстий методом спирального фрезерования и приспособления для агрегатно-сборочного производства.
2. Портативные машины применяются в труднодоступных местах или местах с ограниченным доступом. Эти машины обеспечивают возможность механической обработки отверстий сверлением, развертыванием, протягиванием. Совершенствование этих машин направлено на уменьшение их массы и автоматизацию управления режимом резания в процессе обработки отверстия.
3. Для обработки большого количества отверстий применяются автоматизированные стационарные установки, оснащенные сверлильно-зенкеровальными устройствами, многокоординатные и радиально-сверлильные станки, но в последнее время существует тенденция к замене этих устройств роботами, что обеспечивает повышение гибкости этих установок. Еще одной современной тенденцией является применение клепальных автоматов (АК), которые обеспечивают за один автоматический цикл изготовление

[1] По материалам сайта : http://www.knaapo.ru/rus/about/technology/compl_razv.wbp.

заклепочного соединения с последовательным выполнением всех операций технологического процесса: сверление, зенкерование, вставка заклепки, образование замыкающей головки, зачистка закладной потайной головки, контроль и герметизация.

5. Обрабатывающие головки или модули для спирального фрезерования, разработанные для стационарных станков и промышленных роботов, значительно расширяют область применения спирального фрезерования как метода получения отверстий в пакетах ВПКМ/металл. Портативные головки достаточно компактны и применяются, как правило, совместно с кондукторными плитами.
6. Затраты на сборочные приспособления в современном производстве летательных аппаратов могут достигать 10% общих производственных затрат. Сокращение этих издержек возможно за счет применения реконфигурируемых программно-управляемых приспособлений. Тенденция активного внедрения таких приспособлений наметилась в последние годы.
7. В современном авиационном сборочном производстве для сокращения расходов применяются новые типы приспособлений, в частности универсально-сборные приспособления (УСП). Концепция использования этих приспособлений предполагает сборку приспособления необходимой конструкции из стандартных элементов, в т.ч. изготовленных из ВПКМ.
8. Перспективным этапом дальнейшего развития УСП является процесс автоматизации их сборки при помощи роботов. Применение роботов дешевле по сравнению с ручной сборкой и наладкой приспособлений.
9. В последние годы вводятся в эксплуатацию реконфигурируемые программно-управляемые приспособления, обеспечивающие полную автоматизацию настройки приспособления для изготовления, сборки и контроля заданного конструктивного элемента ЛА, например, стенд для изготовления и стыковки фюзеляжа с лазерной системой измерения, в значительно более короткие сроки, чем при создании (изготовлении и сборке) традиционного приспособления.

# Заключение

В ближайшие годы композиционные материалы будут уверенно занимать лидирующие позиции во многих отраслях промышленности, и в первую очередь в авиастроении. Практический опыт и многочисленные исследования показали, что полностью отказаться от применения металлов и сплавов в пользу композиционных материалов на данном этапе развития техники невозможно. Поэтому широкое распространение получают соединения пакетов ВПКМ/металл или металл/ВПКМ/металл. Технологии производства таких соединений на сегодняшний день востребованы и активно развиваются. Они подразумевают изготовление отверстий различного назначения и степени точности. Для соединений пакетов ВПКМ/металл отсутствие повреждений обработанных поверхностей имеет большее значение, чем размерная точность. При формировании отверстий в ВПКМ расслаивание, термическая деструкция, разлохмачивание и заусенец являются основными типами дефектов. Поэтому применение технологических приемов, рациональный выбор инструмента и оснастки направлены на обеспечение качества поверхности.

Находят применение три основных типа технологических процессов изготовления отверстий: однопроходная технология, многопроходная технология без промежуточной разборки, многопроходная технология с промежуточной разборкой. Основной тенденцией в развитии технологии производства отверстий для соединения пакетов является сокращение стадий обработки, которое реализуется применением твердосплавного осевого инструмента с ультрадисперсными алмазными покрытиями, совершенствованием формы заточки инструмента и использованием специальных технологических приемов.

Обозначились тенденции применения автоматизированного оборудования с ЧПУ, механизированных приспособлений, промышленных роботов. В будущем они позволят увеличить надежность технологии изготовления соединений, повысить их качество и существенно снизить себестоимость их изготовления.

# Список литературы


1. Martin R. Reducing Costs in Aircraft: The Metals Affordability Initiative Consortium / R. Martin, D. Evans // Journal of Operations Management. – 2000. – Vol. 52, no. 3. – P. 24–28.
2. Федоров В. Б. Технология сборки изделий авиационной техники / В. Б. Федоров. – Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2003. – 50 с.
3. Технология сборки самолетов / В. И. Ершов, В. В. Павлов, М. Ф. Каширин, В. С. Хухорев. – М. : Машиностроение, 1986. – 456 с.
4. Campbell F. C. Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials / F. C. Campbell. – Elsevier, 2006. – 616 p.
5. Baker A. A. Composite Materials for Aircraft Structures / A. A. Baker. – Eurospan, 2004. – 400 p.
6. Younossi O. Military airframe costs: the effects of advanced materials and manufacturing processes / O. Younossi, M. Kennedy, J. C. Graser. – Santa Monica : RAND, 2001. – 160 p.
7. Resetar S. A. Advanced Airframe Structural Materials: A Primer and Cost Estimating Methodology / S. A. Resetar, J. C. Rogers, R. W. Hess. – Santa Monica : RAND, 1991. – 128 p.
8. Iicewicz L. Past Experiences and Future Trends for Composite Aircraft Structure [Electronic resource] / L. Iicewicz. – 2009. – Access mode : http://www.coe.montana.edu/me/faculty/cairns/Composites/11-10-09li.pdf.
9. Boeing Company About the 787 Family: Boeing 787 Product Information [Electronic resource] / Boeing Company. – 2010. – Access mode : http://www.boeing.com/commercial/787family/background.html.
10. Vijayaraghavan A. Drilling of Fiber-Reinforced Plastics – Tool Modeling and Defect Prediction [Electronic resource] / A. Vijayaraghavan. – 2006. – 46 p. – Access mode : http://www.cs.berkeley.edu/~sequin/CS285/PAPERS/Athulan-Masters.pdf.
11. Campbell F. C. Manufacturing Processes for Advanced Composites / F. C. Campbell // Elsevier Science. – 2004. – Issue 1. – 532 p.
12. Durão L. M. Machining of hybrid composites : Ph.D. dissertation : 05.03.01 / L. M. Durão. – Porto, 2005. – 242 p.
13. Tucker W. Corrosion between a graphite/polymer composite and metals / W. C Tucker, R. Brown, L. Russell // Journal of Composite Materials. – 1990. – Vol. 24, no. 1. – P. 93–102.
14. Joining concepts for hybrid aluminum-composite structures / [J. Ehrstrom, T. Crawford, C. Hénon at al.] // Advanced Materials & Processes. – 2009. – Vol. 167, no. 5. – P. 44.

15. Niu M. C. Composite Airframe structures / M. C. Niu. – Hong Kong : Conmilit Press Ltd., 1992. – 686 p.
16. Буланов И. М. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов / И. М. Буланов, В. В. Воробей. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1998. – 257 с.
17. Иванов Ю. Л. Современные технологические процессы сборки планера самолета / Ю. Л. Иванов. – М. : Машиностроение, 1999. – 304 с.
18. Kelly G. Load Introduction in Carbon Fibre Composites for Automotive Applications / G. Kelly // Department of Aeronautics Royal Institute of Technology. – Stockholm, 2002. – P. 1–11.
19. Russel J. D. Composites Affordability Initiative: Transitioning Advanced Aerospace Technologies through Cost and Risk Reduction / J. D. Russel // The AMMTIAC Quarterly. – 2007. – Vol. 1, no. 3. – P. 3–6.
20. Руководство по технологичности самолетных конструкций / НИАТ. – М. : НИАТ, 1983. – 1 с.
21. Колганов И. М. Технологичность авиационных конструкций, пути повышения / И. М. Колганов, П. В. Дубровский, А. Н. Архипов. – Ульяновск : УлГТУ, 2003. – 148 с.
22. Boldt J. A. Solid-tool machining and drilling / J. A. Boldt, J. P. Chanani // Engineered materials handbook. – 1987. – Vol. 1. – P. 667–672.
23. ASM Handbook : ASM International, 2001. – Vol. 21 : Composites. – 2605 p.
24. Lawlor V. P. Characterisation of damage development in single-shear bolted composite joints / V. P. Lawlor, W. F. Stanley, M. A. McCarthy // Journal of Plastics, Rubber and Composites. – London : The Institute of Materials, 2010. – Vol. 31, no. 3. – P. 126–133.
25. Dinicola A. J. Bearing Strength Behavior of Clearance-Fit Fastener Holes in Toughened Graphite/Epoxy Laminates / A. J. Dinicola, S. C. Fantle // Composite Materials : Testing and Design. – 1993. – Vol. 11. – P. 220–237.
26. Faria P. E. Dimensional and Geometric Deviations Induced by Drilling of Polymeric Composite / P. E. Faria, J. C. Campos Rubio, A. M. Abrao // Journal of Reinforced Plastics and Composites. – 2009. – Vol. 28, no. 19. – P. 2353–2364.
27. Brinksmeier E. Drilling of Multi-Layer Composite Materials consisting of Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP), Titanium and Aluminum Alloys / E. Brinksmeier, R. Janssen // CIRP Annals–Manufacturing Technology. – 2003. – Vol. 51, no. 1. – P. 87–90.
28. Davim J. P. Machining of composite materials / J. P. Davim. – London : Wiley, 2010. – 262 p.
29. Machining carbon fibre materials : user's guide. – Stockholm : Sandvik Coromant, 2010. – 63 p.
30. Amit Y. Experimental investigation and analysis for bearing strength behavior of composite laminates : master's thesis : 05.03.01 / Y. Amit. – Wichita, 2006. – 81 p.

31. Schön J. Fatigue life prediction of composite bolted joints with bolt failure / J. Schön // Fatigue. – Stockholm, 2002. – Vol. 2, no. 5. – P. 1119–1126.
32. Davim J. P. Drilling of composite materials / J. P. Davim. – New York : Nova Science Publishers, 2009. – 179 p.
33. Tagliaferri V. Effect of drilling parameters on the finish and mechanical properties of GFRP composites / V. Tagliaferri, G. Caprino, A. Diterlizzi // Int. J. of Machine tools & Manufacture. – 1990. – Issue 1. – Vol. 30, no. 1. – P. 77–84.
34. Hamdoun Z. Influence of the drilling on the fatigue behaviour of carbon epoxy laminates / Z. Hamdoun, L. Guillaumat, J. L. Lataillade // International Journal of Fatigue. – Elsevier, 2006. – Issue 1. – Vol. 28. – P. 1–8.
35. Persson E. Effects of hole machining defects on strength and fatigue life of composite laminates / E. Persson, I. Eriksson, L. Zackrisson // Composites Part A. – 1997. – Issue. 2. – Vol. 28. – P. 141–151.
36. Zitoune R. Study of drilling of composite material and aluminium stack / R. Zitoune, V. Krishnaraj, F. Collombet // Composite Structures. – 2010. – Vol. 92, no. 5. – P. 1246–1255.
37. Koboević N. Metode i načini osiguranja kvalitete pri izradi otvora bušenjem u kompozitnim materijalima (Methods and Ways of Ensuring Hole Fabrication Quality During Drilling Process of Composite Materials) : master's thesis : 05.03.01 / N. Koboević. – Dubrovniku, 2003. – 151 p.
38. Madiwal S. Analysis of surface finish in drilling of composites using neural networks / S. Madiwal // B. E. Karnatak University. – 2006. – P. 1–94.
39. Drilling of composite structures / F. Lachaud, R. Piquet, F. Collombet, L. Surcin // Composite Structures. – 2001. – Vol. 52. – P. 511–516.
40. Ghidossi P. Contribution à l'étude de l'effet des conditions d'usinage d'éprouvettes en composites à matrice polymère sur leur réponse mécanique : Ph.D. dissertation : 05.03.01 / P. Ghidossi. – Ecole, 2003. – 166 p.
41. Delamination Analysis of Carbon Fibre Reinforced Laminates / A. T. Marques, L. M. Durão, A. G. Magalhães, J. M. Tavares // 16th International Conference on Composite Materials. – Porto, 2007. – P. 1–10.
42. Comparison of Tool Effects on Hybrid Laminates after Drilling / [Durão L. M., Tavares J. M., Marques A. T. et al.]. – 5th International Conference on Mechanics and Materials in Design. – Porto, 2006. – P. 1–14.
43. Kim D. Drilling process optimization for graphite/bismaleimide–titanium alloy stacks / D. Kim, M. Ramulu // Composite Structures. – 2004. – Vol. 63, no. 1. – P. 101–114.
44. Assessment of the exit defects in carbon fiber-reinforced plastic plates caused by drilling / H. Zhang, W. Chen, D. Chen, L. Zhang // Key Engineering Materials. – 2001. – Vol. 196. – P. 43–52.
45. Sedlacek J. Analysis of Delamination in Drilling of Composite Materials / J. Sedlacek, M. Slany // Science Jornal. – 2010. – Vol. 3, no. 6. – P. 194–197.

46. Chen W. Some experimental investigations in the drilling of Carbon Fibre-Reinforced Plastic (CFRP) composite laminates / W. Chen // Int. J. of Machine tools & Manufacture. – 1997. – Vol. 37, no. 8. – P. 1097–1108.
47. Faraz A. Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates / A. Faraz, D. Biermann, K. Weinert // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2009. – Vol. 49. – P. 1185–1196.
48. Mehta M. Effect of fastener hole drilling anomalies on structural integrity of PMR-15/Gr composite laminates / M. Mehta, T. J. Reinhart, A. H. Soni // Proceedings of the Machining Composite Materials Symposium. – 1992. – P. 113–126.
49. Hocheng H. Delamination during drilling in composite laminates / H. Hocheng, C. K. Dharan // Journal of Engineering for Industry : Trans. of ASME. – 1990. – Issue 112. – P. 236–239.
50. Hocheng H. The path towards delamination-free drilling of composite materials / H. Hocheng, C. C. Tsao // Journal of Materials Processing Technology. – 2005. – Vol. 167. – P. 251–264.
51. Won M. S. Chisel Edge and Pilot Hole Effects in Drilling Composite Laminates / M. S. Won, C. K. Dharan // J. of Manuf. Science and Engineering : Trans. of ASME. – 2002. – Vol. 124, no. 2. – P. 242–247.
52. Experimental Evaluation of Delamination in Drilling Fiber Reinforced Polymeric Composite Materials / U. A. Khashaba, A. I. Selmy, I. A. El-Sonbaty, A. A. Megahed // EJEST. – 2008.
53. Drilling of fiber reinforced plastics: A review / [A. M. Abrao, P. E. Faria, Campos Rubio et al.] // Journal of Materials Processing Technology. – 2007. – Vol. 186, no. 1–3. – P. 1–7.
54. Hocheng H. Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits / H. Hocheng, C. C. Tsao // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – Vol. 140, no. 1–3. – P. 335–339.
55. Kolhar A. S. Analysis of Delamination in Drilling of Circular Plate Composite Materials with a Multi-face Drill Bit : Bachelor's thesis: 05.03.01 / A. S. Kolhar. – Wichita, 2007. – 71 p.
56. Tsao C. C. Effect of eccentricity of twist drill and candle stick drill on delamination in drilling composite materials / C. C. Tsao, H. Hocheng // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2005. – Vol. 45. – P. 125–130.
57. Tsao C. C. Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material / C. C. Tsao, H. Hocheng // Int. J. of Machine tools & Manufacture. – 2004. – Vol. 44. – P. 1085–1090.
58. Ozaki M. Supervisory Control of Drilling of Composite Materials : Ph.D. dissertation : 05.03.01 / M. Ozaki. – Berkeley, 2000. – 139 p.
59. Astrom T. Manufacturing of polymer composites / T. Astrom. – Taylor & Francis Group, 1997. – Vol. 1. – 467 p.

60. Strakel M. Drill Bit Investigation / M. Strakel. – Sydney : School of mechanical engineering, 1997. – 98 p.
61. Bharar R. S. On Drilling of Advanced Aerospace Composite / R. S. Bharar. – Melbourne : Royal Melbourne Institute of Technology, 1991. – 15 p.
62. Khashaba U. A. Delamonation in Drilling GFP-thermoset Composites / U. A. Khashaba // Composite Structures. – 2004. – Vol. 63. – P. 313–327.
63. Kalidas S. Experemental conditions of the effect of drills coating under dry and wet conditions / S. Kalidas, R. E. DeVor // Surface and Coatings Technology. – 2001. – Vol. 148. – P. 117–128.
64. Experimental analysis of drilling damage in thin carbon/epoxy plate using special drills / R. Piquet, B. Ferret, F. Lachaud, P. Swider // Composites. – 2000. – Vol. 31. – P. 1107–1115.
65. Sakamoto S. Precision Drilling of CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) with Coated Tools / S. Sakamoto, Y. Kajiwara, H. Yasui // ASPE Proceedings. – 2007.
66. Technical Guidance. – Sumitomo Electric, 2001. – 52 p.
67. Garrick R. Drilling Advanced Aircraft Structures with PCD (Poly-Crystalline Diamond) Drills / R. Garrick // SAE International. – Utah U.S.A, 2007. – P. 1–9.
68. Denkena B. Helical Milling of CFRP-Titanium Layer Compounds / B. Denkena, D. Boehnke, J. H. Dege // Proceedings of CIRP HPC 2008. – 2008. – P. 121–130.
69. Drilling Induced Damage in FRP Composite Laminates / I. Singh, D. Nayak, R. Saxena, N. Bhatnagar // IE(I) Journal-MM. – 2004. – Vol. 85. – P. 37–40.
70. Tsao C. C. Effects of exit back-up on delamination in drilling composite materials using a saw drill and a core drill / C. C. Tsao, H. Hocheng // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2005. – Vol. 45. – P. 1261–1270.
71. Sheikh-Ahmad J. Y. Machining of Polymer Composites / J. Y. Sheikh-Ahmad. – Technology & Engineering, 2008. – 230 p.
72. Ramulu M. A study on the drilling of composite and titanium stacks / M. Ramulu, T. Branson, D. Kim // Composite Structures. – Washington, 2001. – Vol. 54, no. 1. – P. 67–77.
73. Wang J. Y. A predictive depth of penetration model for abrasive waterjet cutting of polymer matrix composites / J. Y. Wang, D. M. Guo // Journal of Materials Processing Technology. – 2002. – Vol. 121. – P. 390–394.
74. Strategies for bum minimization and cleanability in aerospace and automotive manufacturing / [M. Avila, J. Gardner, C. Reich-Weiser et al.] // SAE Transactions J. of Aerospace. – 2005. – Vol. 114. – P. 1073–1082.
75. Воробьев Ю. А. Анализ исследований по сверлению смешанных пакетов из композиционных материалов и титановых сплавов / Ю. А. Воробьев, А. И. Николенко, А. Ю. Воробьев // Технология производства летательных аппаратов. – Х. : Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», 2008. – С. 1–3.

76. Kim D. Study on the Drilling of Titanium/Graphite Hybrid Composites / D. Kim, M. Ramulu // Transactions of the ASME. – 2007. – Vol. 129, no. 2. – P. 390–396.

77. Bi S. Experimental studies and optimization of process parameters for burrs in dry drilling of stacked metal materials / S. Bi, J. Liang // Int. J. Adv. Manuf. Technology. – Springer, 2010. – P. 867–876.

78. Hellstern C. Investigation of Interlayer Burr Formation in the Drilling of Stacked Aluminum Sheets : master's thesis : 05.03.01 / C. Hellstern. – Tbilisi, 2009. – 146 p.

79. Newton T. R. An experimental study of interfacial burr formation in drilling of stacked aluminum sheets / T. R. Newton, J. Morehouse, S. N. Melkote, S. Turner // Transactions of NAMRI/SME. – 2007. – Vol. 36. – P. 437–444.

80. Dornfeld D. Strategies for Preventing and Minimizing Burr formation / D. Dornfeld // Proceedings of CIRP HPC 2008. – 2008. – P. 1–17.

81. Koplev A. The cutting process, chips, and cutting forces in machining CFRP / A. Koplev, A. Lystrup, T. Vrom // Composites. – 1983. – Vol. 14, no. 4. – P. 371–376.

82. Kaneeda T. CFRP cutting mechanism (1st report): Surface generation mechanism at very low speeds / T. Kaneeda, T. Masayuki // Journal of the Japan Society of Precision Engineering. – 1989. – Vol. 55. – P. 1456–1461.

83. Arola D. Chip formation in orthogonal trimming of graphite/epoxy composite / D. Arola, M. Ramulu, D. H. Wang // Composites. – 1996. – Vol. 27. – P. 121–133.

84. Larsi L. Macromechanical and micromechanical modelling of machining long fiber reinforced polymer composites : Ph.D. dissertation : 05.03.01 / L. Larsi – Paris, 2009. – 150 p.

85. Wang X. M., Zhang L. C. An experimental investigation into the orthogonal cutting of unidirectional fibre reinforced plastics / X. M. Wang, L. C. Zhang // Int. J. of Machine tools & Manufacture. – 2003. – Vol. 43. – P. 1015–1022.

86. Komanduri R. Machining fiber-reinforced composites / R. Komanduri // Mechanical Engineering. – 1995. – Vol. 115, no. 4. – P. 58–64.

87. Gordon S. A review of the cutting of composite materials / S. Gordon, M. T. Hillery // J. Materials : Design and Applications. – 2003. – Vol. 217. – P. 35–46.

88. Cabrera F. M. Sur l'usinabilit´e des composites `a matrices polym`eres renforc´ee par des fibres / F. M. Cabrera // M´ecanique & Industries. – 2010. – Vol. 11. – P. 93–103.

89. Iliescu D. Approches experimentale et numerique de l'usinage a sec des composites carbone/epoxy : Ph.D. dissertation : 05.03.01 / D. Iliescu. – Paris, 2008. – 219 p.

90. Hocheng H. Machinability of Some Fiber-Reinforced Thermoset and Thermoplastics in Drilling / H. Hocheng, H. Y. Puw, K. C. Yao // Materials and Manufacturing Processes. – 1994. – Vol. 6. – P. 653–682.

91. Arola D. Orthogonal cutting of fiber-reinforced composites : a finite element analysis / D. Arola, M. Ramulu // Int. J. of Mechanical Science. – 1997. – Vol. 39, no. 5. – P. 597–613.

92. Wang D. H. Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite: Part I: Unidirectional laminate / D. H. Wang, M. Ramulu, D. Arola // Int. J. of Machine tools & Manufacture. – 1995. – Vol. 35, no. 12. – P. 1623–1638.

93. Bhatnagar N. On the machining of fiber reinforced plastic (FRP) composite laminates / N. Bhatnagar, N. Ramakrishnan, N. K. Naik, R. Komanduri // Int. J. of Machine tools & Manufacture. – 1995. – Vol. 35, no. 5. – P. 701–716.

94. Nayak D. Machining studies of uni-directional glass fiber reinforced plastic (UD-GFRP) composites part 1: Effect of geometrical and process parameters / D. Nayak, N. Bhatnagar, P. Mahajan // Machining Science and Technology. – 2005. – Vol. 9, no. 4. – P. 481–501.

95. Takeyama H. Machinability of glass-fiber reinforced plastics and application of ultrasonic machining / H. Takeyama, N. Iijima // Annals of CIRP. – 1988. – Vol. 37, no. 1. – P. 93–96.

96. Основи теорії різання матеріалів : підручник / [Н. П. Мазур, Ю. М. Внуков, В. Л. Доброскок та ін.]. – Львів : Новий світ, 2010. – 422 с.

97. Gubbels G. Diamond Turning of Glassy Polymers : Ph.D. dissertation : 05.03.01 / G. Gubbels. – Eindhoven, 2006. – 221 p.

98. Masuda M. Failure of tungsten carbide-cobalt alloy tools in machining of carbon materials / M. Masuda, Y. Kuroshima, Y. Chujo // Wear. – 1993. – Vol. 169. – P. 135–140.

99. Experimental and numerical method for determining temperature distribution in a wood cutting tool / J. Y. Sheikh-Ahmad, C. M. Lewandowski, J. A. Bailey, J. S. Stewart // Experimental Heat Transfer. – 2003. – Vol. 16, no. 4. – P. 255–271.

100. Spur G. Turning of fiber-reinforced plastics / G. Spur, U. E. Wunsch // Manufacturing Review. – 1988. – Vol. 1, no. 2. – P. 124–129.

101. Rodriguez C. Cutting edge preparation of precision cutting tools by applying micro-abrasive jet machining and brushing / C. Rodriguez. – Kassel : Kassel university press, 2009. – 205 p.

102. Внуков Ю. Н. Зношування і стійкість різальних лезових інструментів / Ю. Н. Внуков, В. А. Залога. – Сумы : СумГУ, 2010. – 245 с.

103. Girot F. High-speed abrasive milling of ceramic matrix composite materials / F. Girot // Conference franco-allemande sur l'usinage grande vitesse. – Metz, 1997. – P. 351–356.

104. Rawat S. Wear mechanisms and tool life management of WC–Co drills during dry high speed drilling of woven carbon fibre composites / S. Rawat, H. Attia // Wear. – 2009. – Vol. 267, no. 5–8. – P. 1022–1030.

105. Reimann W. Bearbeitung von faserverstarkten Kunststoffen bei hohen schnittgeschwindigkeiten / W. Reimann // Technische Mitteilungen: Organdes Hausesder Technik. – 1988. – B. 81. – S. 240–243.

106. Beckwith S. W. Drilling, Cutting, Machining Composite Materials and Structures [Electronic resource] / S. W. Beckwith // SAMPE Journal. – 2009. – Vol. 45, no. 2. – P. 1–2. – Access mode : http://www.sampe.org/Other/TechTidbitsMarApr09.pdf.

107. Fernandes M. Intelligent automated drilling and reaming of carbon composites : Ph.D. dissertation : 05.03.01 / M. Fernandes. – University of Wollongong, 2005. – 195 p.

108. Peters S. T. Handbook of composites / S. T. Peters. – London : Chapman & Hall, 1998. – 1120 p.

109. Colligan K. New tool drills both titanium and carbon composites / K. Colligan // American Machinist. – 1994. – Vol. 138, no. 10. – P. 56–58.

110. Abrate S. Machining of composite materials / S. Abrate // Composites engineering handbook. – New York : Marcel Dekker, 1999. – P. 777–810.

111. Born G. G. Single-Pass Drilling of Composite/Metallic Stacks [Electronic resource] / G. G. Born. – Access mode : http://papers.sae.org/2001-01-2573.

112. Stephenson D. A. Metal cutting theory and practice / D. A. Stephenson, J. S. Agapiou. – London : CRC Press LLC, 2006. – 846 p.

113. УкрНИАТ. Разработка технологии выполнения высоконагруженных соединений [Электронный ресурс] / УкрНИАТ. – К., 2011. – Режим доступа : www.ukrniat.com/page/125/.

114. Automatic Front & Back Counterbore and Spotfacing Tool: Catalogue 2007/2008 / Heule tool corporation, 2007. – 7 p.

115. Hocheng H. On Drilling Characteristics of Fiber-Reinforced Thermoset and Thermoplastics / H. Hocheng, H. Y. Puw // Int. J. of Machine tools & Manufacture. – 1992. – Vol. 32, no. 4. – P. 583–592.

116. Davim J. P. Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using design experiments / J. P. Davim, P. Reis // Composite Structures. – 2003. – Vol. 59, no. 4. – P. 481–487.

117. Kim D. Evaluation of Advanced Cutting Tool Materials for Drilling Composite/Metal Stacks / D. Kim, P. Kwon // Washington State University. – Vancouver, 2008. – P. 1–20.

118. Teti R. Machining of Composite Materials / R. Teti // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2002. – Issue 2. – Vol. 51, no. 2. – P. 611–634.

119. Murphy C. The performance of coated tungsten carbide drills when machining carbon fibre-reinforced epoxy composite materials / C. Murphy, G. Byrne, M. D. Gilchrist // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (Part B: Journal of Engineering Manufacture). – 2002. – Vol. 216, no. 2. – P. 143–152.

120. Ramulu M. Drilling of graphite/bismaleimide composite material / M. Ramulu, P. Young, H. Kao // J. Mater. Eng. Performance. – 1999. – Vol. 8, no. 3. – P. 330–338.

121. Weinert K. Cutting temperatures and their effects on the machining behaviour in drilling reinforced plastic composites / K. Weinert, C. Kempmann // Advanced Engineering Materials. – 2004. – Vol. 6, no. 8. – P. 684–689.

122. Mujahed A. Cryogenic drilling of Kevlar composite laminates : master's thesis : 05.03.01 / A. Mujahed. – Dhahran, 2004. – 111 p.

123. Malhotra S. K. Some studies on drilling of fibrous composites / S. K. Malhotra // Jornal of Materials Processing Technology. – 1990. – Vol. 24. – P. 291–300.

124. Shinsaku H. Tool Wear Mechanism in Cutting of CFRP [in Japanese] / H. Shinsaku, J. Fujiwara, M. Nomura // Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. – 1994. – Vol. 60, no. 569. – P. 297–302.

125. Influence of tool wear on internal damage in small diameter drilling in GFRP / [H. Inoue, E. Aoyama , T. Hirogaski et al.] // Composite Structures. – 1997. – Vol. 39. – P. 55–62.

126. Lin S. C. Drilling carbon fiber-reinforced composite material at high speed / S. C. Lin, I. K. Chen // Wear. – 1996. – P. 156–162.

127. Klocke F. PCD in machining of fibre-reinforced materials / F. Klocke, C. Wurtz // Industrial Diamond Review (IDR). – 1999. – Vol. 59. – P. 65–70.

128. Hocheng H. Computerized Tomography and C-scan for Measuring Drilling-Induced Delamination in Composite Material Using Twist Drill and Core Drill / H. Hocheng, C. C. Tsao // Engineering Materials. – 2007. – Vol. 339. – P. 16–20.

129. Jain S. Delamination-Free Drilling of Composite Laminates / S. Jain, D. C. Yang // Journal of Engineering for Industry: Trans. of ASME. – 1994. – Issue 116. – P. 475–481.

130. Tsao C. C. The effect of pilot hole on delamination when core drill drilling composite materials / C. C. Tsao // Int. J. of Machine tools & Manufacture. – 2006. – Vol. 46, no. 12–13. – P. 1653–1661.

131. Tsao C. C. Effect of Tool Wear on Delamination in Drilling Composite Materials / C. C. Tsao, H. Hocheng // Int. J. of Mechanical Science. – 2007. – Vol. 49, no. 8. – P. 983–988.

132. Hocheng H. Effects of special drill bits on drilling-induced delamination of composite materials / H. Hocheng, C. C. Tsao // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2006. – Vol. 46, no. 12–13. – P. 1403–1416.

133. Ekici E. Experimental investigation of surface damage occurred on the sides of hole entrance in drilling of glass-fiber reinforced polymer composite materials / E. Ekici, B. Işık // Technology. – 2010. – Vol. 13, no. 1. – P. 31–40.

134. Muller-Hummel P. New cutting tool geometry for milling and drilling of CFRP and CFRP/Titanium Stack materials [Electronic resource] / P. Muller-Hummel // SME Webinar. – 2009. – Access mode : http://sme.org/uploadedFiles/Events/Webinars/4-6-09.pdf.

135. Tsao Effect of deviation on delamination by saw dril / C. C. Tsao // Int. J. of Machine tools & Manufacture. – 2007. – Issue 47. – P. 1132–1138.

136. Zitoune R. Experimental and analytical study of the influence of HexFit glass fiber composite manufacturing process on delamination during drilling /

R. Zitoune, F. Collombet, L. G. Hernaiz // Int. J. Machining and Machinability of Materials. – 2008. – Vol. 3. – P. 326–342.

137. Zitoune R. Numerical prediction of the thrust force responsible of delamination during the drilling of the long fibre composite structures / R. Zitoune, F. Collombet // Composites. – 2007. – Vol. 38. – P. 858–866.
138. Study on Tool Wear Mechanism of CFRP Cutting II / [H. Shinsaku, F. Junsuke, K. Tooru et al.] // Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. – 2005. – Vol. 71, no. 702. – P. 719–724.
139. Guegan P. Contribution a l'usinage des materiaux composites / P. Guegan, M. F. Le, J. C. Hamann // La construction navale en composites. – Paris, 1992. – P. 470–479.
140. Engdahl N. C. CVD Diamond-Coated Rotating Tools for Composite Machining [Electronic resource] / N. C. Engdahl // Crystallume. – 2010. – Access mode : http://www.crystallume.com/html/composite_ machining.html.
141. Mathew P. Trepanning on unidirectional composites: delamination studies / P. Mathew, N. Ramakrishnan, N. K. Naik // Composites: Part A: Applied Science and Manufacturing. – 1999. – P. 951–959.
142. Davim J. P. Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave-experimental and statistical study / J. P. Davim, P. Reis // Materials and Design. – 2003. – Vol. 24, no. 5. – P. 315–324.
143. Tsao C. C. Experimental study of drilling composite materials with step-core drill / C. C. Tsao // Materials and Design. – 2008. – № 29. – P. 1740–1744.
144. Tsao C. C. Parametric study on thrust of core drill / C. C. Tsao, H. Hocheng // Journal of Materials Processing Technology. – 2007. – Vol. 192, no. 192–193. – P. 37–40.
145. Iscar drills : Catalogue / Iscar, 2010. – 15 p.
146. Фельдштейн Е. Э. Металлорежущие инструменты / Е. Э. Фельдштейн, М. А. Корниевич. – Мн. : Новое знание, 2009. – 1040 с.
147. KomPass. Bore machining. – Besigheim : KOMET Precision Tools GmbH & Co. KG, 2007. – 768 p.
148. Technical Reference & Special Services. Precision Twist Drill Co., 2009. – 3 p.
149. Aerospace special : Catalogue. – Lomas Engineering, 2010. – 6 p.
150. Lee S. J. An Analysis of the Drill Wandering Motion / S. J. Lee, K. F. Eman, S. M. Wu // Trans. ASME. – 1987. – Vol. 109, no. 4. – P. 297–305.
151. MAPAL News 2010. – Aalen : MAPAL, 2010. – 31 p.
152. Kennametal 8070. – Latrobe : Kennametal Inc., 2008. – 866 p.
153. Tool geometry evaluation for carbon reinforced composite laminates / [L. M. Durão, D. J. Gonçalves, J. M. Tavares et al.] // COMATCOMP. – Porto, 2009. – P. 1–5.
154. Zhang Q. A Study of High Performance Twist Drill Design and the Associated Predictive Force Models : Ph.D. dissertation : 05.03.01 / Q. Zhang. – New South Wales, 2007. – 218 p.

155. Rujikietgumjorn S. Development of predictive models for drilling composite materials : Ph.D. dissertation : 05.03.01 / S. Rujikietgumjorn. – Texas, 1978. – 275 p.

156. Wong F. B. Effect of drill geometry of uncoated tool when drilling titanium alloy, Ti-6Al-4V : master's thesis : 05.03.01 / F. B. Wong. – Universiti Teknologi Malaysia, 2008. – 80 p.

157. Li R. Experimental and Numerical Analysis of High-Throughput Drilling of Titanium Alloys : Ph.D. dissertation : 05.03.01 / R. Li. – University of Michigan, 2007. – 167 p.

158. Krishnaraj V. An investigation on high speed drilling of glass fibre reinforced plastic (GFRP) / V. Krishnaraj, S. Vijayarangan, G. Suresh // Indian Journal of Engineering & Materials Sciences. – 2005. – Vol. 12. – P. 189–195.

159. Krishnaraj V. Effects of Drill Points on Glass Fibre Reinforced Plastic Composite While Drilling at High Spindle Speed / V. Krishnaraj // Proceedings of the World Congress on Engineering. – 2008. – Vol. 2. – P. 1–7.

160. Tsao C. C. Influence of Drill Geometry in Drilling Carbon Fiber Reinforced Plastics / C. C. Tsao // Key Engineering Materials : Trans Tech Publications, 2008. – Vol. 375. – P. 236–240.

161. Davim J. P. Machining Fundumentals and Resent Advances / J. P. Davim. – London : Springer-Verlag, 2008. – 361 p.

162. Velayudham A. Effect of point geometry and their influence on thrust and delamination in drilling of polymeric composites / A. Velayudha, R. Krishnamurthy // Jornal of Materials Processing Technology. – 2007. – Vol. 185, no. 1–3. – P. 204–209.

163. Won M. S. Drilling of aramid and carbon fibre polymer composites / M. S. Won, C. K. Dharan // J. of Manuf. Science and Engineering : Trans. of ASME. – 2002. – Vol. 124, no. 2. – P. 778–783.

164. Enemuoh E. U. Smart drilling of advanced fibre reinforced composite materials : Ph.D. thesis : 05.03.01 / E. U. Enemuoh. – Columbia, 2000. – 472 p.

165. Recoules Top Quality Drills, Reamers & Drill/Countersink Cutters : Cooper Tools, 2003. – 6 p.

166. Adams L. Efficient method for unsupported drilling of composites [Electronic resource] / L. Adams. – 1994. – Access mode : http://www.sacomposites.com/PDF/drill_method.pdf.

167. Tsao C. C. Investigation into the effects of drilling parameters on delamination by various step-core drills / C. C. Tsao // Jornal of Materials Processing Technology. – 2008. – Vol. 206, no. 1–3. – P. 405–411.

168. W. L. Fuller Inc. online catalog. – 2010. – Acces mode : http://www.wlfuller.com/html/catalog.html.

169. Hempstead B. Composite Automatic Wing Drilling Equipment (CAWDE) / B. Hempstead, S. Williams // SAE International. – 2006. – P. 1–8.

170. Kihlman H. Affordable Reconfigurable Assembly Tooling: An Aircraft Development and Manufacturing Perspective : Ph.D dissertation : 05.02.08 / H. Kihlman. – Linköpin, 2002. – 111 p.

171. Naing S. Feature Based Design for Jigless Assembly : Ph.D. dissertation : 05.02.08 / S. Naing. – Cranfield, 2004. – 255 p.

172. Tsao C. C. The effect of chisel length and associated pilot hole on delamination when drilling composite materials / C. C. Tsao, H. Hocheng // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2003. – Vol. 43. – P. 1087–1092.

173. Tsao C. C. Effect of pilot hole on thrust force by saw drill / C. C. Tsao // Int. J. of Machine tools & Manufacture. – 2007. – Vol. 47, no. 14. – P. 2172–2176.

174. Mechanical drilling processes for titanium alloys: A literature review / P. F. Zhang, N. J. Churi, Z. J. Pei, C. Treadwell // Machining Science and Technology. – 2008. – Issue 12. – Vol. 12, no. 4. – P. 417–444.

175. Основи теорії різання матеріалів : підручник / [Н. П. Мазур, Ю. М. Внуков, В. Л. Доброскок та ін.]. – Львів : Новий світ, 2010. – 422 с.

176. Cordell J. Study of positive feed drilling parameters for optimized drilling in stackups of compositelmetallic materials / J. Cordell, K. Stump, C. Shaver // SAE International. – 2005. – P. 3325.

177. Whinnem E. Development of Orbital Drilling for the Boeing 787 / E. Whinnem, G. Lipczynski, I. Eriksson // SAE International Journal Aerospace. – 2009. – Vol. 1, no. 1. – P. 811–816.

178. Advanced Portable Orbital-Drilling Unit for Airbus Final Assembly Lines / [B. Marguet, F. Wiegert, O. Lebahar et al.] // SAE International. – 2007. – Vol. 116. – P. 3849.

179. Park K. Y. Delamination free and high efficiency drilling of carbon fibre reinforced plastics / K. Y. Park, J. H. Choi, D. G. Lee // Journal of Composite Materials. – 1995. – № 29. – P. 1988–2002.

180. Пасічник В. А. Технологія отримання отворів у композиційних матеріалах і методи контролю якості обробки / В. А. Пасічник, О. В. Глоба // Технологічні системи. – К., 2011. – № 4. – С. 48–53.

181. Механическая обработка волокнистых полимерных композитов / Н. В. Верезуб, А. П. Тарасюк, Г. Л. Хавин, А. А. Гетманов. – Х. : Изд-во ХНАДУ (ХАДИ), 2001. – 179 с.

182. Некрасов С. С. Повышение ресурса твердосплавных фрез при обработке литейных сталей аустенитного класса : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / С. С. Некрасов. – К., 2012. – 167 с.

У монографії висвітлено наукові засади і методи механічної обробки волокнистих полімерних композиційних матеріалів та пакетів волокнистих полімерних композиційних матеріалів з металами. Описані особливості обробки отворів, інструментальне забезпечення, режими різання, обладнання та технологічні прийоми. Основну увагу зосереджено на свердлінні отворів і процесах стружкоутворення, зносу, дефектоутворення, а також теплових явищах, що виникають у зоні різання. Наведено детальний аналіз дії різних чинників на розшарування композиційних матеріалів. Запропоновано раціональні режими різання композиційних матеріалів і пакетів з їх використанням та параметри різального інструменту.

Для магістрів, аспірантів, науковців, інженерів, робітників машинобудівної і літакобудівної галузі промисловості.

Наукове видання

**Криворучко** Дмитро Володимирович
**Залога** Вільям Олександрович
**Колесник** Віталій Олександрович та ін.

**Механічна обробка композиційних матеріалів при складанні літальних апаратів**
(аналітичний огляд)

Монографія

(Російською мовою)

Головний редактор В.І. Кочубей.
Дизайн обкладинки і макет В.Б. Гайдабрус
Комп'ютерна верстка В.Б. Гайдабрус, А.О. Литвиненко.
Технолог Є.В. Грищенко

Підписано до друку 22.11.2013.
Формат 60x84 $^{1}/_{16}$. Папір офсетний. Гарнітура Скулбук.
Друк цифровий. Ум. друк. арк. 17,7. Обл.-вид. арк. 15,5.
Тираж 300 прим. Замовлення № Д13-12/09

Відділ реалізації: тел./факс: (0542) 65-75-85; e-mail: info@book.sumy.ua

ТОВ «ВТД «Університетська книга», 40009, м. Суми, вул. Комсомольська, 27
E-mail: publish@book.sumy.ua; www.book.sumy.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 489 від 18.06.2001

Віддруковано на обладнанні ВТД «Університетська книга»
вул. Комсомольська, 27, м. Суми, 40009, Україна
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 489 від 18.06.2001

# Высокоэффективная обработка волокнистых композиционных материалов

**ИСКАР. Передовой инструмент - современному производству!**

Member IMC Group

ISCAR

www.iscar.com

Member IMC Group

# ИСКАР:
# инновации и партнёрство

Когда в 1952 выходец из Германии Стеф Вертаймер открыл в небольшой крытой пристройке к своему дому в приморском городке Нагария компанию ИСКАР (ISCAR) по изготовлению режущего инструмента, никто не мог предположить, что спустя несколько десятилетий она превратится в международного гиганта и станет лидиром в мировой инструментальной промышленности. В чем причина такого головокружительного скачка? Как в только что образовавшемся молодом государстве Израиль, не имевшем ни полезных ископаемых, ни серьёзных традиций в металлообработке, могло состояться такое процветающее предприятие? В чём залог его успеха? Неуемная энергия создателей ИСКАРа? Счастливый случай? Удача? А, может быть, само присутсвие на Святой Земле? Вероятно, такой вопрос стоял и перед гуру американских инвесторов Уорреном Баффетом, холдинг которого *Berkshire Hathaway* в 2006 году совершенно неожиданно приобрёл 80% акций ИСКАРа, а в 2013 – и оставшиеся 20%. Что заставило Оракула из Небраски впервые в своей истории заключить сделку за пределами США? Остаётся только гадать, но одним из условий сделки Баффет поставил сохранение существующего положения компании и неизменность её руководства, подчеркнув, что всё достигнутое создано трудом работников ИСКАРа, и следует лишь помогать им продолжать начатое.

Сегодня собственно ИСКАР составляет сердцевину транснациональной корпорации IMC Group (*International Metalworking Companies*), куда, кроме ИСКАРа, входят такие крупные компании, как TaeguTec (Корея), Ingersoll Cutting Tools (США), Ingersoll Werkzeuge (Германия), Tungalloy (Япония), а также ряд более мелких фирм: Métaldur (Швейцария), Outiltec (Франция), Unitac (Япония), UOP (Италия) и др. Производственные мощности ИСКАРа находятся в различных странах: Израиле, Соединённых Штатах, Китае, Корее, странах Европы и Латинской

Америки, а отделения и дистрибьюторы компании представлены практически повсеместно.

ИСКАР известен своей приверженностью к постоянным и смелым инновациям, что во многом способствовало его блестящему взлёту. В активе компании ряд действительно знаковых нововведений, определивших развитие инструментального производства:

- разработка 1980-х годов в области отрезных и канавочных резцов (*SELF-GRIP* и *CUT-GRIP* соответственно), когда пластина закреплялась в державке лишь за счёт сил упругости последней и не требовала дополнительных зажимных элементов;
- появление в начале 1990-х линии фрез *HELIMILL* с прессованной пластиной с винтовой задней поверхностью (т.е. спиральной режущей кромкой), которая обеспечила постоянство переднего и заднего углов фрезы вдоль кромки;
- производство в конце 1990-х системы сборных сверл *CHAMDRIL* со сменной твёрдосплавной режущей головкой;
- выпуск в начале XXI века первых серийных образцов модулярного сборного вращающегося инструмента *MULTI-MASTER*, когда резьба специального профиля изготавливалась непосредственно на хвостовике режущей головки из твёрдого сплава.

Непрерывный поиск новых проектных и технологических решений и большие инвестиции в НИИОКР – характерная черта компании. Не остаются в стороне и последние достижения науки: в последнее время большое внимание уделяется развитию наноструктурированных покрытий и технологии нанопорошков.

Сегодня ИСКАР производит полный спектр резцов, фрез, осевого и резьбонарезного инструмента (как со сменными пластинами (СМП), так и монолитного) и инструментальную оснастку. В последнее время акцент делается на прогрессивные конструкции, предназначенные для высокопроизводительного резания и направленные на увеличение рентабельности предприятия-заказчика. Для инструмента с СМП новая концепция перекликается с передовой технологией упрочняющей обработки поверхности пластин SUMO TEC уже после нанесения защитного износостойкого покрытия.

Превратившись во всеотраслевого поставщика инструмента, ИСКАР активно участвует в реализации программ инструментального обеспечения проектов “под ключ”, совместно со станкостроительными фирмами разрабатывая предложения по технологическим процессам обработки и специализированному инструменту.

В дополнение к верности непрекращающимся инновациям ИСКАР исповедует принцип открытого сотрудничества с потребителем, рассматривая себя не столько в качестве поставщика инструмента, сколько как действительного партнёра заказчика в снижении себестоимости механической обработки и, как следствие, в увеличении прибыльности. Как полагают в компании, инструмент, занимающий скромное место среди составляющих себестоимости, может сыграть решающую роль в повышении производительности и таким образом существенно снизить расходы на операцию. А правильный подбор такого инструмента и его грамотное применение и создают базу для прочного плодотворного и взаимовыгодного сотрудничества.